

CALCULOS METALURGICOS
Tomo I



UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITECNICA
ANTONIO JOSÉ DE SUCRE

CALCULOS METALURGICOS

TOMO I

1000°C

Pb (liq.)

Zn (liq.)

Ing.º Miguel A. Cordoba M.

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITECNICA
"ANTONIO JOSE DE SUCRE"
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA
BARQUISIMETO

CALCULOS METALURGICOS

Por
Ing. MIGUEL A. CORDOBA M.
Profesor

Trabajo culminado durante la Licencia Sabática 1997 – 1998

Noviembre - 1998

CALCULOS METALURGICOS

TOMO I

CONTENIDO

TOMO I

TOMO II

NOTAS SOBRE EL AUTOR

MIGUEL A. CORDOBA M es Profesor Titular de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" (UNEXPO), adscrito al Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Vice – Rectorado de Barquisimeto, Venezuela. Obtuvo el título de Ingeniero Metalúrgico en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), 1971 y el de Magister Scientiarum en Metalurgia en la UNEXPO, 1992. El Ing. Córdoba ha realizado trabajos en el área de Fundición de Metales y en Concentración de Minerales por Flotación y por Gravedad. Desde el punto de vista administrativo, se ha desempeñado entre otros como Jefe de la Sección de Metalurgia Química (1982 – 1983) y como Jefe del Depto. de Ingeniería Metalúrgica de la UNEXPO (1983 – 1985). Ha desarrollado su labor docente a nivel de pregrado en los departamentos de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Metalúrgica del Instituto Universitario Politécnico de Barquisimeto, hoy UNEXPO, impartiendo conocimientos en las asignaturas siguientes: Ciencia de Materiales, Tecnología de Materiales I, Tecnología de Materiales II, Procesos Metalúrgicos, Metalurgia Extractiva I, Concentración de Minerales por Flotación, Siderurgia y actualmente en Físico – Química Metalúrgica y en Termodinámica Metalúrgica.

Gracias a **YIRA** *y a* **DEYANIRA,**
por el amor filial y marital que me
profesan.

PROLEGOMENO

Desde el punto de vista de la Ingeniería Metalúrgica, el concepto de "metal puro", prácticamente carece de sentido; bien sea por la cantidad de materia prima que interviene en un proceso de obtención, porque tecnológicamente los metales deben asociarse para conseguir de ellos las mejores respuestas a las solicitudes que se les hacen cuando son puestos en servicio, e incluso porque cuando en la naturaleza se presentan en forma "metálica"; siempre lo hacen mezclados con una gran cantidad de impurezas o formando aleaciones naturales.

Desde que el mineral que contiene el metal es extraído, hasta que se pone en servicio a través del metal "técnicamente" obtenido a partir de él, tiene que pasar por un sin número de procesos y operaciones unitarias; algunos muy sencillos y otros muy complejos por la cantidad de factores que intervienen, pero siempre que se habla de la obtención de los metales industriales nos vemos inducidos a pensar en que estos se encuentran en un yacimiento (en forma mineral) que contiene millones de toneladas y que los equipos a propósito de su tratamiento, procesan miles de toneladas por unidad de tiempo; razón por la cual se hace casi imposible encontrar un factor de escala confiable que permita la representatividad de estas magnitudes con los resultados de un ensayo de laboratorio miniaturizado, que analice solo gramos, como convencionalmente se supone que se hace en universidades como la UNEXPO.

Para el estudio, comprensión y sistematización de las operaciones y procesos unitarios que contribuyen a la conformación de una ingeniería como la metalúrgica, al igual que un buen soporte teórico se hace necesario un buen equipamiento en lo referente a los laboratorios, pero estos últimos en lo relacionado con la ingeniería en general y particularmente los de metalurgia no se encuentran completos en ninguna universidad del mundo, entre otras razones, por el costo que suponen, por los permanentes cambios tecnológicos, por la magnitud y complejidad de la materia prima que se analiza y por la multiplicidad de procesos a los que van dirigidos; si tomamos en consideración el que cada paso en un proceso integrado supone la realización de pruebas de control y ajuste en muchas direcciones.

Razones como las anteriores obligan al estudiante de Ingeniería Metalúrgica a ser muy imaginativo, para poder abstraerse en la comprensión del fenómeno metalúrgico y así desarrollar toda su capacidad analítica e inductiva.

Como una ayuda a los estudiantes de Ingeniería Metalúrgica de la UNEXPO, Vice – Rectorado de Barquisimeto, se ha desarrollado el presente trabajo que consiste en la solución a 549 ejercicios relacionados con esta rama de la ingeniería; los cuales responden a una colección de problemas que de naturaleza teórico – práctica, aparecen en su mayoría propuestos en la bibliografía reportada al final mientras que otros son propuestos por mi. Muchos de estos ejercicios están formulados con datos reales extraídos de procesos en planta, y en general conducen al estudiante a un mejor entendimiento de esta carrera.

Se espera que los ejercicios seleccionados puedan servir de apoyo y consulta, para una mejor comprensión de asignaturas como: Fisicoquímica, Termodinámica, Procesos Metalúrgicos, Metalurgia Extractiva I, Metalurgia Extractiva II, Concentración de Minerales por Flotación, Siderurgia, Metalografía y Fundición.

Para el estudio de la ingeniería, la resolución de problemas numéricos no solo sirve para demostrar o comprobar los principios sobre los cuales estos se fundamentan, sino también, para desarrollar la habilidad con que se pueden utilizar estos principios cuando se trata de enfrentar un trabajo de orden práctico. Por eso, los problemas fueron seleccionados para poner de manifiesto los métodos que se emplean corrientemente en la industria al momento de calcular las cargas de los hornos, los volúmenes de gas, el calor y su flujo, los índices de recuperación, los rendimientos, etc

El mayor valor de un trabajo como este es quizás el de preparar al estudiante en la aplicación de diferentes principios técnicos a un problema específico. La integración, correlación y aplicación de principios que el alumno ha aprendido o asimilado de una manera más o menos aislada

en sus cursos de química, física, termodinámica, matemáticas y otras ramas de la ciencia, buscando con eso, cerrar la brecha entre la teoría y la práctica.

Por razones de tiempo no se refieren los fundamentos teóricos sobre los que se apoyan las soluciones a los ejercicios que aparecen en cada capítulo, tampoco se incluye ningún tipo de material descriptivo, así como el dibujo de los diversos aparatos que intervienen en un proceso tales como hornos, trituradoras, molinos, filtros, condensadores, etc. Solo en casos muy especiales se ha hecho necesario la inclusión de algún tipo de esquema que pueda hacer comprensivo el flujo de la materia y el calor. Se espera por tanto que toda la información preparatoria sea obtenida por el estudiante en sus clases teóricas y en sus consultas bibliográficas.

No se recomienda a los estudiantes abordar la lectura o el estudio de los ejercicios de este trabajo, si antes no se ha dejado bien esclarecido el fundamento teórico, pues aunque algunos de ellos son tan sencillos que apenas requieren de una operación con la calculadora; otros contienen cálculos muy laboriosos y se corre el riesgo de memorizarlos para reproducirlos mecánicamente sin comprenderlos, con la consecuencia de no saber que hacer si se introduce una ligera modificación en los datos o en el texto planteado. Lo que sí se recomienda previamente es la lectura de la bibliografía propuesta como un complemento a la información obtenida en las clases.

Tampoco es lo adecuado "tirar un cachazo" para ver que sale, porque eso representaría una muestra de inseguridad en lo estudiado. El estudiante debe estar seguro de la compresión de cada uno de los aspectos particulares que plantea el ejercicio y de poder concatenarlos sistemáticamente hasta llegar a un entendimiento racional del planteamiento y de la solución del problema. Incluso, si se tienen claros los principios fundamentales, ser capaz de plantear alternativas a la solución presentada sin mayores dificultades.

El contenido del presente trabajo fue distribuido de la siguiente forma:

CAPITULO I (14 Ejercicios). Los cálculos realizados se pueden resumir de la siguiente manera: Distribución, por peso y por volumen, de las cargas (mineral más cuerpos moledores) en un molino de bolas – Densidad de un mineral a partir de sus especies componentes – Ordenación sistemática, mediante fórmulas, de los componentes de una superficie clasificadora como son el número de la malla (conocido también como # mesh o # del tamiz), la luz o abertura de la malla y el diámetro del alambre – Correlación de los tamices que conforman una serie para determinar la posición o ubicación de cualquiera de ellos si se toma otro tamiz como referencia – Velocidad crítica del molino.

Casi todas las fórmulas que aparecen en este capítulo fueron introducidas por mi (no se encontraron en la bibliografía consultada), pero el principal aporte personal consistió en el cálculo de una serie nueva de tamices, sobre la base de una progresión geométrica cuya razón fue Ln 3 (ejercicio # 14).

CAPITULO II (27 ejercicios). Se realizan cálculos relacionados con la concentración de minerales por gravedad, medios densos y flotación, abordando aspectos como los siguientes: Isodromia y Velocidad de Caída Límite (influenciadas por propiedades como la densidad, la forma y el tamaño de los granos). – Clasificación Previa a la Concentración por Gravedad, para determinar el número necesario de tamices. – Tiempo utilizado en el descenso de partículas en un medio fluido en reposo. – Comportamiento de Partículas en Corriente Ascensional, para lograr una separación completa de las especies. – Preparación Sintética de Reactivos de Flotación. – Cantidad de reactivos a utilizar en una operación de flotación. – Determinación de la Densidad de la Pulpa para Flotación. – Relación Agua-Sólido. – Gravedad de la Pulpa. – Peso de los Productos de Flotación (concentrados y colas). – Razón de Concentración. – Diseño Determinativo del Factor de Escala, para tiempos de retención en laboratorio y en planta. – Determinación del Número de Celdas, necesarias para flotar una cantidad determinada de mineral. – Manera de Agrupar las Celdas, dependiendo del flujo de la pulpa. – Parámetros de Recuperación.

CAPITULO III (44 ejercicios). Apoyados en la Ley de Conservación de la Materia y utilizando diferentes sistemas de unidades, en términos generales se enfocaron aspectos como los siguientes: Balances Estequiométricos. – Reacciones con Gases. – Balance de Materias, para diferentes procesos con y sin exceso de reactivos. – Relaciones Estequiométricas, para reacciones tanto homogéneas como heterogéneas. – Relación entra masa y volumen para sustancias gaseosas. – Composición Mineralógica y de Mezclas de Sustancias, en diferentes estados. – Densidad y Peso Específico Relativo, utilizando escalas en términos de grados Baumé, API y Twaddell. – Aplicación de la Ley de los Gases Ideales. – Relaciones entre masa, presión y temperatura, - Cambios de condiciones de los gases ideales. –

Determinación del Peso Molecular Promedio de una mezcla gaseosa. – Determinación de la Fórmula de un Compuesto Gaseoso.

CAPITULO IV (70 ejercicios). Loa cálculos de este capítulo se resumen así: Combustibles Sólidos (composición, cenizas, residuos, carbono sin quemar). – Análisis y Calidad de los Carbones. – Efecto del Azufre en los Carbones. – Combustibles Líquidos. – Combustibles Gaseosos, húmedos y secos. – Cambio del Volumen del Gas, con la temperatura y la presión. – Combustión (completa e incompleta). – Aire necesario para la combustión (teórico, exceso, enriquecido, húmedo, seco, frío y precalentado). – Productos de Combustión (húmedos y secos). – Potencia Calorífica del Combustible (sólido, líquido y gas). – Contenido de Calor, en un cuerpo caliente. – Temperatura Obtenida en la Combustión (llama). – Pérdidas y Recuperación del Calor.

En el apéndice aparecen tablas extraídas de (7), las cuales fueron utilizadas como apoyo a la solución de los ejercicios de este libro. Para la solución de los ejercicios seleccionados de otros libros, como los que aparecen en la bibliografía reseñados con los números (8), (9) y (11), se siguen mecanismos diferentes a los de (7) y las tablas que se utilizaron no aparecen en el apéndice. Por tanto, se recomienda al estudiante o al lector de este trabajo consultar dichas tablas en los textos de la referencia.

CAPITULO V (38 ejercicios). Los cálculos realizados en este capítulo, en términos generales se refieren a: Producción de Coque y Sub-productos. – Coque Producido, por tonelada de carbón utilizado. – Potencia calorífica (del coque y del carbón). – Producción de Gas (de aire, de gas, pobre, de coque, etc.). – Gas Producido (seco y húmedo), por tonelada de carbón. – Potencia Calorífica del Gas.

CAPITULO VII (42 ejercicios). Cálculos realizados sobre Alto Horno y Cubilote: Beneficio del Hierro. – Reducción de Oxidos. – Consumo de Carbono (al frente y encima de las toberas). – Consumo de Coque (en el alto horno). – Ecuación de Reducción y Consumo Teórico de Coque. – Consumo de Aire y su Precalentamiento en Estufas. – Uso del Aire Enriquecido. – Peso del Mineral y del Fundente. – Producción y Utilización del Gas de Alto Horno. – Producción de Arrabio y de Escoria. – Composición del Arrabio, de la Escoria y del Gas de Alto Horno. – Balance de Cargas del Alto Horno. – Temperatura Teórica Máxima del Alto Horno. – Temperatura Crítica, Consumo de Coque y Potencia Requerida para la Fusión. – Eficiencia Térmica de las Estufas y las Máquinas a Gas. – El Cubilote.

CAPITULO VIII (26 ejercicios). Cálculos realizados sobre producción de acero. PROCESO BESSEMER: Arrabio Cargado. Requerimientos de Aire Normal y Enriquecido. – Tiempo de Duración de los Períodos de Soplado para la Eliminación de Impurezas. – Corrosión del Revestimiento Refractario. – Peso y Composición de los Productos del Proceso (acero, escoria y gas). – Productos Gaseosos en cada Período. – Adición del CaO en el Proceso Básico. – Adición de Ferroaleaciones. – Generación de calor en cada Período por Oxidación de Impurezas. HORNO DE HOGAR ABIERTO (Open Hearth): Flujo de Gases en el Horno. – Carga y Productos del Proceso. – Oxidación de Impurezas. – Desoxidación. – Eficiencia de los Regeneradores de Calor. HORNO ELECTRICO: Tiempo Requerido para el Calentamiento, Fusión y Sobrecalentamiento de la Carga. – Refino del Acero. – Ferroaleaciones Desoxidantes. – Desulfuración del baño. – Balance de cargas. – Eficiencia Electrotérmica de cada Período. – Requerimientos de Potencia Eléctrica.

CAPITULO IX (12 ejercicios). Cálculos realizados: Requerimientos de Potencia para Comprimir el Soplo (Fórmula Adiabática y/o Método Diagramático). – Volumen de Aire y Cálculo de la Velocidad del Gas. – Tiro o Corriente de Aire. – Utilización del Gas de Alto Horno en Estufas para Calentamiento y en Máquinas a Gas. – Generación de Potencia en Máquinas a Gas. – Condiciones de Soplado en Convertidores. – Tiempo de Soplado por Período en Convertidores. – Poder Ascensional de los Gases. – Altura de la Columna de gas. – Eficiencia de la Chimenea.

CAPITULO X (17 ejercicios). Resumen de los Cálculos: Trabajo (presión – volumen). – Entalpía. – Energía Interna. CALOR SUMINISTRADO: Calor Generado por la Combustión de los Combustibles. – Producción de Energía en Hornos Eléctricos. – Calor Sensible en el Combustible Precalentado. – Calor Sensible en el Aire Precalentado. – Calor Sensible en la Carga del Horno. – Calor Desarrollado en el Horno por las Reacciones Exotérmicas. Calor de Formación de la Escoria. DISTRIBUCION DEL CALOR: Calor Consumido en el Horno por Reacciones Endotérmicas. – Calor Utilizado en Evaporación de la Humedad. – Calor Absorbido por el Agua de Enfriamiento. – Calor de Formación del Arrabio. – Calor Utilizado en la Reducción de Oxidos. – Calor Utilizado en la Descomposición de los Carbonatos. – Calor Absorbido cuando $FeS \rightarrow CaS$. – Calor Sensible en los

Productos de Combustión Calientes. – Calor Sensible en los Productos Principales del Horno (metal o mata). – calor Sensible en ls Escoria. – Pérdidas de calor por Conducción, Convección y radiación. – Eficiencia Térmica del Alto Horno. BALANCES DE CALOR: Balances de Calor del Alto Horno. – Balance de calor del Convertidor Bessemer. – Balances de Carga y de Calor del Horno de Hogar Abierto. – Balance de Calor de un Horno Giratorio. – Balance de Calor en Procesos de Coquización. – Balances de Carga y de Calor en un Horno Eléctrico.

CAPITULO XI (5 ejercicios). Resumen de los Cálculos. CALCULO DE CARGAS PARA EL ALTO HORNO: Método de Sumatoria de Lima (CaO). – Método Algebraico.

CAPITULO XII (29 ejercicios). Resumen de cálculos sobre aleaciones binarias: Porcentajes Atómico y en Peso de los Componentes. – Constitución de Diagramas de Equilibrio con Diferentes Tipos de Solubilidades. – Curvas de Enfriamiento. – Fases Presentes en una Aleación a una Temperatura Determinada. – Determinación de la Composición de Cada fase Presente en una Zona de Coexistencia. – Cantidad Relativa de Cada Fase en la Zona de Coexistencia ((Regla de las Palancas, Método Diagramático y/o Método Algebraico). – Calor de Fusión de Aleaciones. – Gravedad Específica. – Porcentaje del Campo Visto Bajo el Microscopio Correspondiente a Cada Constituyente. – Cálculos Metalográficos para Aceros y Fundiciones. – Reacciones que Ocurren en Sistemas Binarios (eutéctica, peritéctica, etc.).

CAPITULO XIII (6 ejercicios). Resumen de los cálculos: Constantes de Equilibrio. – Composición Alcanzada en el Equilibrio. – Equilibrio y Cambios de Energía Libre. – Dirección Predominante en una Reacción. – Porcentaje de Reactivos Consumidos en Reacciónes Reversibles. – Presiones Parciales. – Temperatura de Equilibrio.

CAPITULO IV (3 ejercicios). Resumen de Cálculos: Secado de Gases y Minerales. – Velocidad de los Gases en el Secado. – Contenido de Calor en el Gas y en el Mineral al Entrar y Salir del Secador. – Balance de Calor en una Operación de Secado. – Eficiencia Térmica en el Secado. – Condiciones de Calcinación.

CAPITULO XV (11 ejercicios). Resumen de Cálculos: Calor Generado en la Tostación. – Balances de Carga y de Calor. – Aire Requerido para la Tostación. – Peso del Mineral Antes y Después de la Tostación. – Composición del Mineral Tostado. – Azufre Eliminado en la Tostación. – Gases de la Tostación. – Combustible para la Tostación. – Peso del Sínter.

CAPITULO XVI (29 ejercicios). Resumen de Cálculos: Cálculo de la Carga para la Fusión (mineral, fundente, combustible, aire). – Métodos de Cálculo (algebraico, fundente). – Productos de la Fusión (mata, escoria, gas). – Conversión a Cobre Blíster. – Contenido de Cobre y otros Elementos en un Mineral. – La Mata (peso, grado y composición). – Tiempos de Conversión (escorificación, formación del blíster). – Velocidad de Soplado para la Conversión. – Temperatura Alcanzada en el Convertidor. – Generación de Calor. – Balance de Cargas. – Balance de Calor.

CAPITULO XVII (27 ejercicios). Resumen de Cálculos: Refino Electrolítico. – Cantidad de Metal Depositado. – Tiempo Requerido para el Depósito. – Circuitos en Serie y en Paralelo. – Depósitos a partir de Soluciones Lixiviadas. – Anodos Solubles de Diversa Composición. – Intensidad, Densidad y Eficiencia de la Corriente. – Número de Tanques por Circuito y por Planta. – Capacidad de la Planta. – Composición del Voltaje de la Celda (conducción, reacción, gaseoso). – Regla de Thomson. – Voltaje por Tanque. – Resistencia y Resistividad del Electrolito. – Separación entre Electrodos. – Potencia Eléctrica Requerida por la Planta. – Volumen de Gas Liberado en el Proceso.

CAPITULO XVIII (9 ejercicios). Resumen de los Cálculos: Carbono Reductor de la Alúmina en la Bauxita. – Potencia Requerida para el Tratamiento de la Bauxita. – Obtención Electrolítica del Aluminio. – Tratamiento del Al_2O_3 en Celda Hall. – Tratamiento del Al_2O_3 por el Proceso Bayer. – Electrólisis del Magnesio por el Proceso de Clorinización. – Electrólisis del Magnesio (Proceso Oxido).

CAPITULO XIX (4 ejercicios). Resumen de los Cálculos: Lixiviación del Cobre. – Lixiviación y Electrólisis del Zinc. – Cianuración y Precipitación con Polvo de Zinc.

CAPITULO XX (22 ejercicios). Resumen de los Cálculos: Cálculo del Punto de Fusión. – Punto Normal de Ebullición. – Calor Latente de vaporización. – Utilización de una Ecuación del Tipo $log\ P = -A/T + B$ (Clausius Clapeyron). – Porcentaje de Saturación de Aire con Agua. – Humedad Relativa del Aire. – Presión de Vapor. – Obtención de Metales por Condensación. – Cambios de la Temperatura con la Presión (Clausius Clapeyron). – Temperatura de Condensación de los Metales. – Cantidad de metal Volatilizado. – Pérdidas de Metal por Volatilización.

CAPITULO XXI (21 ejercicios). Resumen de los cálculos: Composición de Concentrados de Mineral de Plomo. – Composición del Mineral de Plomo Tostado. – Tostación del Mineral de Plomo (carga y productos). – Balance de Calor en la Tostación de Minerales de Plomo. – Sinterización del Mineral de Plomo. – Reducción del Mineral de Plomo en Alto Horno (carga y productos). – Pérdidas de Plomo por Volatilización. – Desplateado del Plomo con Zinc. – Refino Electrolítico del Plomo.

CAPITULO XXII (12 ejercicios). Resumen de los cálculos: Flujo de Calor por Conducción – Sección para la Trayectoria del Flujo (Media Aritmética, Media Logarítmica). – Pérdidas de Calor por Convección y Radiación. – Emisividad. – Resistividad de Materiales. – Temperatura de Cuerpo Negro. – Calor Perdido y Temperatura de la Superficie de un Horno. – Tiempo Requerido para el Calentamiento de la Carga a la Temperatura de Operación. – Diferencia de Temperatura entre las Superficies Interna y Externa de un Horno. – Velocidad del Flujo de Calor.

CAPITULO XXIII (18 ejercicios). Resumen de los Cálculos: Producción de Oxido de Zinc. – Composición de los Vapores Producidos al Reducir el ZnO en Retortas. – Requerimientos de Carbono para Reducir el ZnO. – Requerimientos de Calor para Reducir el ZnO. – Condensación del vapor de Zinc. – Pérdidas de Zinc Como Vapor no Condensado. – Temperaturas del Condensador. – Balance de Calor en un Condensador. – Condensación en la Producción de Mercurio.

CAPITULO XXIV (22 ejercicios). Resumen de los Cálculos: Presión de Vapor y su Relación con la Temperatura. – Cálculo de la Constante "B" a partir de la Contante "A" y el Punto Normal de Ebullición. – Aplicaciones de la Regla de Trouton. – Determinación de las Constantes "A" y "B", a partir del conocimiento de un par de valores de "p" y "T". – Determinación del Calor de Vaporización, a partir de medidas de la Presión de Vapor. – Fórmula de la Presión de Vapor para Sólidos (sublimación). – Precisión de la Fórmula de *log P* para el Zinc. – Efecto del Calor de Combinación de los Elementos en una Aleación. – La Superficie como un Factor en la Presión de Vapor. – Determinación de las Constantes "A" y "B", a partir de medidas de las Presiones de Reacción. – Cálculo de la Temperatura para la Reducción Continua del ZnO por el C.

Todos los cálculos que aparecen en el presente trabajo fueron realizados y revisados por la misma persona, lo cual induce a pensar que los fundamentos en que se apoyan, hayan sido aplicados con un solo criterio, y esto a su vez; puede convertirse en una fuente de imprecisión y/o error. Por esta razón, debido a que esta es la primera presentación de este trabajo, mucho se sabrán agradecer los comentarios, críticas, correcciones, discusiones y sugerencias que conduzcan a una mejoría del mismo.

Miguel Angel Córdoba Moreno.

Barquisimeto, Venezuela.
Noviembre, 1998.

CAPITULO I

CARGAS DE MOLIENDA Y CLASIFICACION

EJERCICIO N° 1

Para la molienda de un mineral de cobre de bajo tenor, se utilizó un molino de bolas cuyo diámetro interior era de 1,5 m y tenía de longitud 3,0 m (ver Fig. 1).

El volumen total de la carga (mineral más cuerpos moledores), fue del 50% de la capacidad del molino, y los cuerpos moledores (bolas de acero al Mn con densidad de 7,79 g/cm^2); constituyeron el 40% de la carga en volumen.

Con el objeto de obtener la granulometría deseada, se utilizó la carga de cuerpos moledores de arranque que se muestra a continuación:

CUERPOS MOLEDORES DE ARRANQUE

BOLAS					
DATOS PROPORCIONADOS		DATOS CALCULADOS			
Diámetro (in)	Peso (%)	Peso 1 bola (Kg.)	Peso total bolas (Kg.)	Volumen total (m^3)	# total de bolas
5,0	17,0	**8,36**	**1404,48**	**0,180**	**168**
4,5	25,0	6,09	2064,51	0,265	339
4,0	20,0	4,28	1652,08	0,212	386
3,5	15,0	2,87	1293,84	0,159	432
3,0	10,0	1,81	828,98	0,106	458
2,5	6,4	1,04	526,24	0,068	506
2,0	3,8	0,54	316,98	0,040	587
1,5	2,8	0,23	235,75	0,030	1025

PREGUNTAS

1. Rellenar la tabla para los cuerpos moledores de arranque.

SOLUCION

1. Para la solución de este interrogante, vamos a realizar el cálculo para una fila (diámetro de 5,0 pulgadas), que se encuentra resaltada en **negritas** en la tabla, advirtiendo que para las demás filas se procede de manera similar.

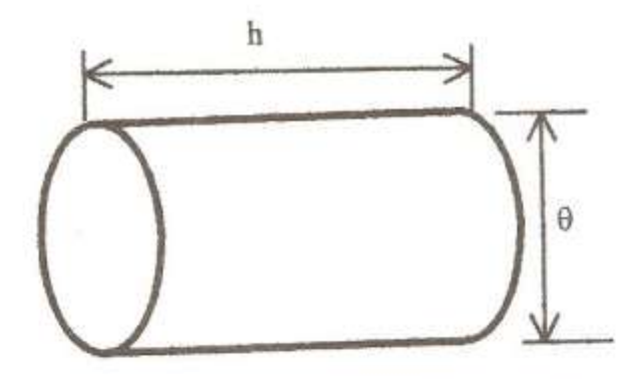


Figura N° 1: Vista de un Molino de Bolas

Lo primero es el cálculo del volumen interior del molino, utilizando la expresión (1):

$$V = \pi r^2 h \qquad (1)$$

Donde:

V = volumen interior del molino (m^3)

θ = diámetro interior del molino (m) = 2r

r = radio interior del molino

h = longitud del molino (m)

$$V = \pi\ (1{,}5/2)^2x3 = 5{,}301\ m^3$$

Calculamos el volumen de la carga:

$$V_{carga} = 5{,}301 \times 0{,}5 = 2{,}651\ m^3$$

Volumen total de las bolas = 2,651 x 0,4 = 1,060 m^3 = 1'060.287 cm^3

Con la expresión (2), calculamos el peso total de las bolas:

$$D = W \div V \qquad (2)$$

Donde:

D = densidad (g/cm^3)
W = peso (g)
V = volumen (cm^3)

W (total bolas) = 1'060.287x7,79 = 8'259.635,73 g = 8259,64 Kg.

Este peso, debemos distribuirlo en cada una de las especies de bolas, de conformidad con lo que muestra la tabla en las columnas de "DATOS PROPORCIONADOS":

Seleccionemos la especie de bolas cuyo diámetro es 5,0 pulgadas y utilicemos la ecuación (3) para calcular su volumen:

$$V_i = (4/3)\pi r^3 \qquad (3)$$

θ = 5,0 in = 12,7 cm

$V_5 = (4/3)\pi(12{,}7/2)^3 = 1072{,}53\ cm^3$
Peso de 1 bola = 1072,53x7,79 = 8355,02 g = **8,36 Kg.**
Peso total de estas bolas = 8259,64x0,17 = **1404,14 Kg.**
de estas bolas = 1404,14/8,36 = **168**
V(total de estas bolas) = 168x1072,53 $(1/100^3)$ = **0,1802 m^3**

Estos resultados que aparecen en *negritas*, son los que también están resaltados del mismo modo en la columna "DATOS CALCULADOS" de la tabla. De esta manera se procede para el cálculo de todas las demás filas que rellenan la tabla (1-1).

EJERCICIO N° 2

Un mineral de cobre tiene la siguiente composición:

Calcopirita ($CuFeS_2$) 1,86% (4,20)
Calcosita (Cu_2S) 0,18% (5,70)
Tenorita (CuO) 0,05% (6,10)
Pirita (FeS_2) 36,84% (4,51)
Galena (PbS) 2,18% (7,58)
Cuarzo (SiO_2) 57,75% (2,65)

(Los números entre paréntesis representan las densidades)

Este mineral es reducido de tamaños en molinos de bolas (ver Fig.1), acoplados en circuito abierto, para la realización de moliendas primaria, secundaria y terciaria; hasta obtener la granulometría adecuada para la posterior etapa de concentración.

Los molinos tienen c/u 2,2 m de diámetro y 3,0 m de longitud.

La carga de arranque (mineral más cuerpos moledores) de c/u de los molinos, constituye el 50% de la capacidad del molino, y el mineral representa el 50% del volumen de la carga, y los cuerpos moledores fueron bolas de acero al Mn (densidad = 7,79 g/cm^3).

La distribución de los cuerpos moledores de arranque, se muestra en el cuadro que aparece en la página siguiente.

PREGUNTAS

1. Calcular el peso del mineral.
2. Rellenar la tabla para los datos de la carga moledora.

SOLUCION

1.

Haciendo uso de (1), calculamos el volumen interior del molino, sabiendo que r = (2,2/2)x100 = 110 cm, y que h = 3x100 = 300 cm, por tanto:

$$V_{Molino} = \pi \cdot (110)^2x300 = 11'403.981{,}33\ cm^3 = 11{,}404\ m^3.$$

DISTRIBUCION DE LA CARGA MOLIENTE
(Bolas de Acero al Mn)

Diámetro de bolas (in)	Molienda Primaria				Molienda Secundaria				Molienda Terciaria			
	Peso (%)	Peso 1 bola (Kg.)	Peso total bolas (Kg.)	# de bolas	Peso (%)	Peso 1 bola (Kg.)	Peso total bolas (Kg.)	# de bolas	Peso (%)	Peso 1 bola (Kg.)	Peso total bolas (Kg.)	# de bolas
4,5	**16,0**	**6,09**	**3554**	**583**								
4,0	**30,0**	4,28	6663	1558								
3,5	**21,5**	2,87	4775	1666								
3,0	**14,0**	1,80	3109	1723	**26,0**	1,80	5774	3199				
2,5	**9,1**	1,04	2201	1936	**36,0**	1,04	7995	7658				
2,0	**5,4**	0,53	1199	2243	**22,0**	0,53	4886	9138				
1,5	**2,4**	0,23	533	2359	**9,2**	0,23	2043	9041				
1,25	**1,6**	0,13	355	2723	**3,2**	0,13	711	5446	**30,0**	0,13	6663	51056
1,0					**1,7**	0,07	378	5635	**32,0**	0,07	7107	106074
0,875					**1,9**	0,05	422	9377	**14,5**	0,05	3220	71563
0,75									**23,5**	0,03	5219	185077

(Los datos en **negritas** son datos proporcionados)

Calculamos el volumen de la carga:

V_{carga} = 11'403.981,33x0,5 = 5'701.990,7 cm^3 = 5,702 m^3

$V_{Mineral}$ = V_{Bolas} = 5'701.990,7x0,5 = 2'850.995,35 cm^3 = 2,851 m^3

Haciendo uso de (2), calculamos el peso tanto del mineral como de las bolas:

El peso total de las bolas será = 2'850.995,35x7,79 = 22'209.253,78 g = 22209,25 Kg.

Para calcular el peso del mineral, debemos antes determinar su densidad, para poder aplicar (2).

De acuerdo a la composición del mineral, si asumimos 1,0 g de mineral, cada especie tendría el peso siguiente:

$CuFeS_2$ = 0,0186 g
Cu_2S = 0,0018 g
CuO = 0,0005 g
FeS_2 = 0,3684 g
PbS = 0,0218 g
ZnS = 0,0114 g
SiO_2 = 0,5775 g

Aplicando (2), calculamos el volumen que ocupan los pesos respectivos de estas especies:

Volumen de:

$CuFeS_2$ = 0,0186/4,2 = 0,0044 cm^3
Cu_2S = 0,0018/5,7 = 0,0003 cm^3
CuO = 0,0005/6,1 = 0,0001 cm^3
FeS_2 = 0,3684/4,51 = 0,0817 cm^3
PbS = 0,0218/7,58 = 0;0029 cm^3
ZnS = 0,0114/4,0 = 0,0029 cm^3
SiO_2 = 0,5775/2,65 = 0,2179 cm^3

Volumen que ocupa 1,0 g de mineral = 0,3102 cm^3 ∴

Densidad del mineral = 1/0,3102 = 3,224 g/cm^3 ∴

El peso del mineral será = 2'850.995,35x3,224 = 9'191.609 g

$W_{Mineral}$ = 9191,6 Kg. (2-1)

2.

La tabla la podemos rellenar, haciendo uso de las ecuaciones (1), (2) y (3). Hagamos el cálculo para una de las especies de bolas, estableciendo que para las demás se procede de manera similar.

Sea la bola de diámetro = 4,5 pulgadas = 11,43 cm.

$V_{4,5} = (4/3)\pi(11,43/2)^3 = 781,87\ cm^3$

Peso de 1 bola = 781,87x7,79 = 6090,77 g = **6,091 Kg.** (2-2)

Peso total de estas bolas = 22209,25x0,16 = **3553,48 Kg.** (2-2)

Número de estas bolas = 3553,48/6,091 = **583** (2-2)

Además de los datos proporcionados, en la tabla también aparecen en **negritas**, en la primera fila, los valores que acabamos de calcular (2-2)

EJERCICIO Nº 3

Se tiene un mineral de la composición siguiente:

$CuFeS_2$ = 3,58% (4,20)
FeS_2 = 18,27% (4,51)
PbS = 3,00 (7,58)
SiO_2 = 75,15% (2,65)

Este mineral se debe moler, hasta la granulometría adecuada para concentrar la calcopirita por flotación.

Se utiliza un molino de bolas cilíndrico de 1,8 m de diámetro interior y 2,0 m de longitud. (ver Fig. 1).

El nivel del régimen de carga del molino, se encuentra a 1,05 m y se muestra en la figura # 2.

La distribución de la carga moliente (bolas de acero al Mn), es la siguiente:

DISTRIBUCION DE LA CARGA MOLIENTE DEL MOLINO

DATOS PROPORCIONADOS		DATOS CALCULADOS		
Diámetro (in)	Peso (%)	Peso 1 bola (Kg)	Peso total bolas (Kg.)	# de bolas
2,0	38,0	0,5347	3765,37	7042
1,5	35,0	0,2256	3468,11	15373
1,25	13,0	0,1305	1288,15	9871
1,0	6,4	0,0670	634,17	9465
0,875	3,1	0,0448	307,18	6857
0,75	4,5	0,0282	445,90	15812

Si la carga moliente debe ocupar el 25% de la capacidad volumétrica del molino:

PREGUNTAS

1. Determinar el porcentaje de la capacidad del molino, ocupada por la carga (mineral más molientes).
2. Determinar los pesos del mineral y de la carga moliente, a la vez que sus porcentajes en volumen y en peso.
3. Determinar el número de bolas a cargar.
4. Calcular la velocidad crítica del molino.

SOLUCION

1.

Para este cálculo, vamos a hacer uso de las figuras (1), (2), (3) y (4), que se muestran en la página siguiente.

Sea :

θ_i = diámetro interior del molino = 1,8 m (Fig. 2)
l = nivel del régimen de carga, incluido el radio del molino
K = nivel del régimen de carga, excluido el radio del molino
r = radio interno del molino.

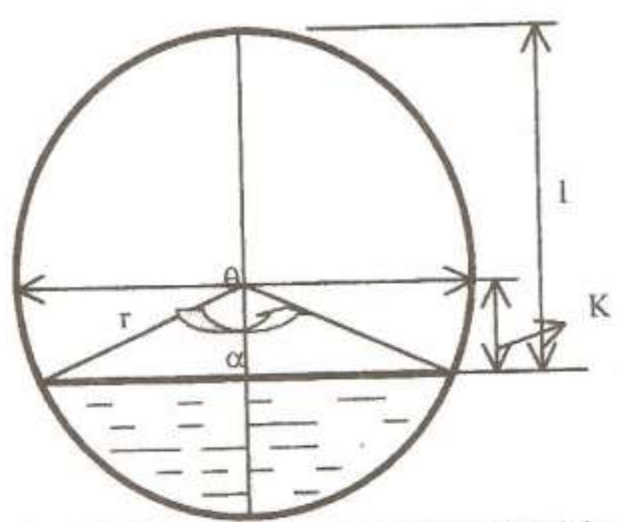


Figura N° 2: Sección del Molino, mostrando el Nivel del Régimen de Carga

Area Rayada = $\frac{1}{2} r^2(\alpha - \text{Sen } \alpha)$ (4)

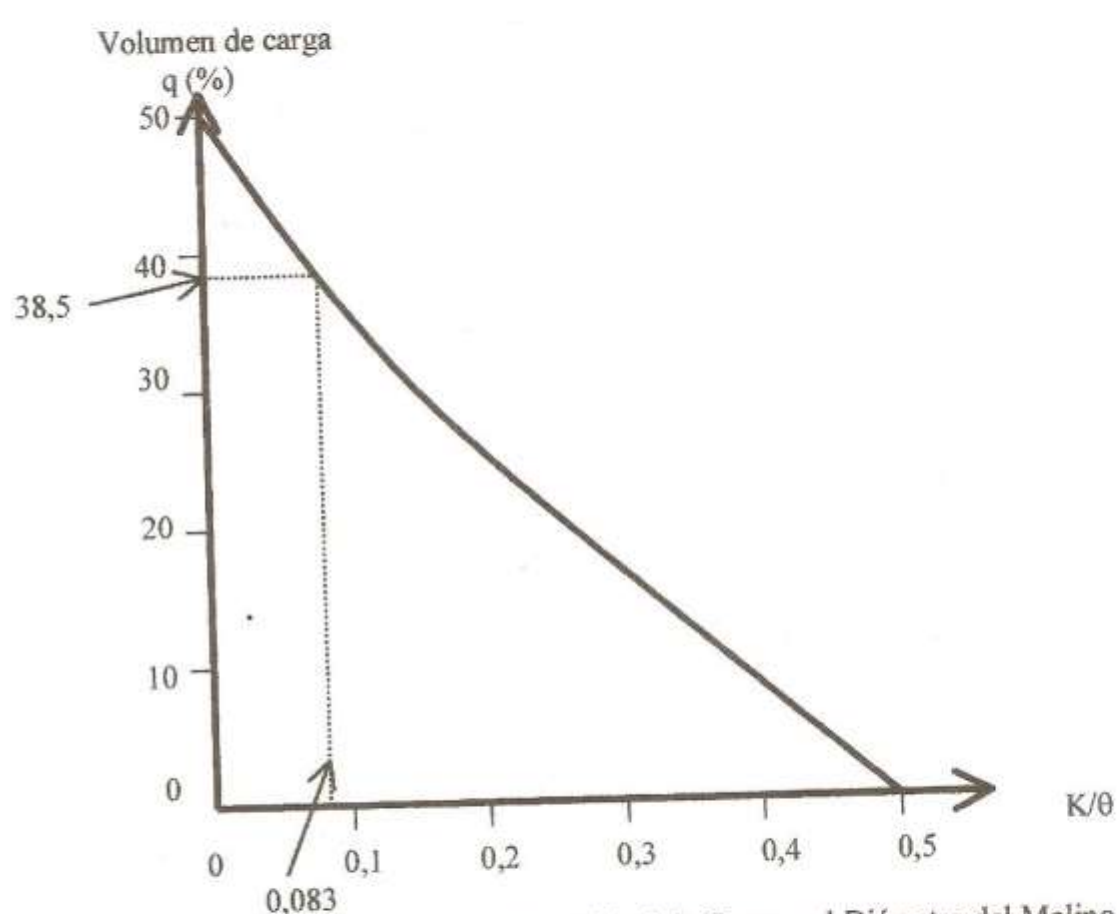


Figura N° 3: Relación entre el Volumen de Carga, el Nivel de Carga y el Diámetro del Molino

En el gráfico de la Fig. 2, se cumple que:

$$l = r + K \quad (5)$$

$$K/\theta = (l/\theta - 0{,}5) \quad (6)$$

Despejando de (5): $K = l - r = 1{,}05 - 1{,}8/2 = 0{,}15$ m

Sustituyendo en (6): $K/\theta = 0{,}15/1{,}8 = 0{,}083$

De la Fig.3, para $K/\theta = 0{,}083$, $q = 38{,}5\%$

Por tanto, si q = % de la carga en volumen, el mineral + molientes, ocupan el 38,5% de la capacidad del molino (3-1)

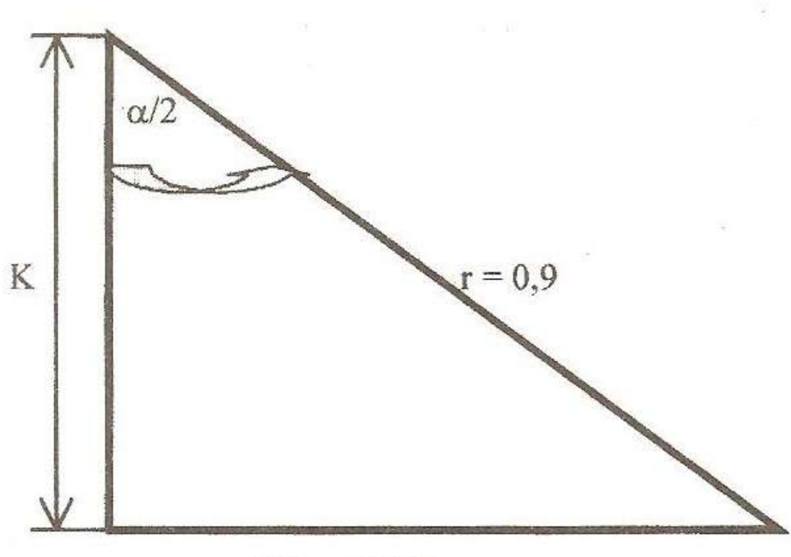


Figura N° 4

2.

Para este cálculo, en primer lugar determinar la densidad del mineral, así:
Supongamos 1 gramo de mineral y determinemos que peso le corresponde a cada especie.

$CuFeS_2$ = 0,0385 g
FeS_2 = 0,1827 g
PbS = 0,0300 g
SiO_2 = 0,7515 g

Haciendo uso de (2), se puede determinar el volumen (cm^3) que ocupa 1 gramo de este mineral:

$CuFeS_2$ = 0,0358/4,2 = 0,0085 cm^3
FeS_2 = 0,1827/4,51 = 0,0405 cm^3
PbS = 0,0300/7,58 = 0,0040 cm^3
SiO_2 = 0,7515/2,65 = 0,2836 cm^3

1 gramo de mineral ocupa un volumen = 0,3366 cm^3

Densidad del mineral = 1 ÷ 0,3366 = 2,971 g/cm^3

En segundo lugar, debemos determinar el volumen de la carga, para lo cual debemos calcular el área rayada con la ayuda de (4); pero como necesitamos el ángulo α, este lo podemos determinar a partir de la Fig. 4.

$\cos \alpha/2 = K/r = 0,15/0,9 \therefore \alpha/2 = 80,405 \therefore \alpha = 160,81°$

1° = π/180 rad., 1 rad = 180°/π

Area rayada = $\frac{1}{2}$ x$(0,9)^2$x((π(160,81/180) – Sen 160,81)) = 1,0036 m^2
Volumen de la carga = 1,004x2 = 2,007 m^3
Capacidad volumétrica del molino = π x $(1,8/2)^2$ x 2 = 5,089 m^3
Volumen de carga moliente = 5,089x0,25 = 1,272 m^3
Volumen del mineral = 2,007 – 1,272 = 0,735 m^3 = 735000 cm^3

Peso del mineral = 735000x2,971 = 2'183.685 g = 2183,7 Kg. (3-2)

Dado que las bolas son de acero al Mn, su densidad es = 7,79 g/cm^3

Peso de la carga moliente = 1'272.000x7,79 = 9'908.880 g = 9908,88 Kg. (3-2)

Con relación al volumen interior del molino, la carga se distribuyó así (3-2):

Mineral = 0,735 m^3 = 14,44%
Bolas = 1,272 m^3 = 25,00%
Vacío = 3,082 m^3 = 60,56%
5,089 m^3 = 100,00%

La distribución de la carga en peso y volumen, se muestra en el cuadro siguiente:

DISTRIBUCION DE LA CARGA				
ESPECIE	PESO		VOLUMEN	
	(Kg.)	(%)	(m^3)	(%)
Mineral	2183,7	18,06	0,735	36,62
Bolas	9908,9	81,94	1,272	63,38
Totales	12092,6	100,00	2,007	100,00

3.

Para este cálculo, procedemos como en los ejercicios anteriores, por ejemplo, dado que disponemos, según la tabla; de "DATOS PROPORCIONADOS", realicemos al cálculo para la primera columna de la tabla:

Diámetro de la bola = 2 pulgadas = 5,08 cm

Volumen de una bola = $4/3\pi(5{,}08/2)^3 = 68{,}642\ m^3$

Peso de una bola = 68,642x7,79 = 534,721 g

Peso total de las bolas de esta especie = 9908,88x0,38 = 3765,37 Kg.

\# de bolas = 3765,37/0,5347 = **7042**

Procediendo así con todas las especies y sumando, al final resulta :

Número de bolas a cargar = 64420 (3-3)

4.

Este cálculo lo realizamos con base en la expresión siguiente:

$$\eta_C = 29{,}9\sqrt{\frac{1}{r-R}} \qquad (7)$$

donde:

η_C = velocidad crítica del molino (r.p.m)

r = radio interno del molino (m)

R = radio de la partícula esférica (m)

Realicemos el cálculo para los tamaños mayor y menor de las bolas que aparecen entre los "DATOS PROPORCIONADOS" de la tabla:

R_1 = 2 pulgadas = 5,08 cm = 0,0508 m

$$\eta_{C1} = 29{,}9\sqrt{\frac{1}{0{,}9-\frac{0{,}0508}{2}}} = 31{,}97 \text{ r.p.m } (3\text{-}4)$$

R_2 = 0,75 pulgadas $\doteq$ 1,905 cm = 0,01905 m

$$\eta_{C2} = 29{,}9\sqrt{\frac{1}{0{,}9-0{,}0095}} = 31{,}68\text{r.p.m } (3\text{-}4)$$

Como puede verse, aunque las velocidades son parecidas, la velocidad crítica calculada para las bolas de mayor tamaño; siempre será mayor que las de tamaño menor. Estas resultarían centrifugadas con las velocidades críticas de las mayores; por lo que en una mezcla de bolas de tamaños diferentes, se debe realizar la molienda a las velocidades requeridas por las bolas de tamaño menor . En este caso, **31,68 r.p.m** (3-4).

EJERCICIO Nº 4

PREGUNTAS

1. Dado un tamiz de la Serie Normal Tyler cuya luz o abertura es de 0,0737 mm, y el diámetro del alambre con que es fabricado es de 0,0533 mm; calcular el número de mallas ó # mesh, por pulgada lineal de 25,5 mm.

2. La abertura de un tamiz de la Serie Normal Tyler es de 0,0737 mm. Calcular el número mesh del tamiz que le precede, si el diámetro del alambre con que es fabricado es de 0,0652 mm.

3. La abertura ó luz de un tamiz de la Serie Tyler Normal es de 0,1041 mm. Calcula el número de mallas del tamiz que le precede, si el diámetro del alambre con que es fabricado es de 0,1067 mm.

4. La abertura ó luz de un tamiz es de 0,1041 mm. Calcular el número mesh del tamiz que es dos veces anterior a él en la Serie Tyler Normal, si el alambre con que es fabricado es de 0,1825 mm.

5. El tamiz # 20 tiene una abertura de 0,8331 mm. Si en la Serie Tyler Normal, el tamiz que le precede es el # 14, calcular el diámetro del alambre con que es fabricado este último.

SOLUCION

1.

La solución a las preguntas de este ejercicio, vamos a encontrarla mediante la introducción de una expresión que correlacione el número de mallas, la luz ó abertura y el diámetro del alambre.

Sea:

A = luz ó abertura de un orificio del tamiz (mm)
B = diámetro del alambre con que se construye el tamiz (mm)
n = número de mallas que posee el tamiz por pulgada lineal de 25,4 mm.

Al ordenar los parámetros anteriores, debe cumplirse que:

$$nA + nB = 25,4 \text{ mm} \qquad (8)$$

En este caso: A = 0,0737 mm, B = 0,0533 mm ∴

$$n = 25,4 \div (A+B)$$

$$n = 25,4 \div (0,0737+0,0533) = \mathbf{200} \text{ (4-1)}$$

2.

En la Serie Normal Tyler, la base es el tamiz de malla 200, y la abertura de cualquier tamiz; es la misma del inmediatamente anterior multiplicada por $\sqrt{2}$.

Haciendo uso de (8), si denominamos con subíndice (1) al tamiz inmediatamente superior al de partida (le precede), tendremos:

$$A_1 = 0,0737\,(2)^{1/2}\text{mm},\ B_1 = 0,0652 \text{ mm.}$$

$$n = 25,4 \div (A_1+B_1) = 25,4 \div (0,1042+0,0652) = 149,9$$

$$\mathbf{n = 150} \text{ (4-2)}$$

3.

En este caso: $A_1 = 0,1041\sqrt{2}$ mm, $B_1 = 0,1067$ mm ∴

$$n = 25,4 / (0,1472+0,1067) = 100$$

$$\mathbf{n = 100} \text{ (4-3)}$$

4.

En este caso, dado que el tamiz está ubicado 2 posiciones por encima del de referencia:

$$A_2 = 0,1041 x \sqrt{2} x \sqrt{2} \text{ mm}$$

$$B_2 = 0,1825 \text{ mm}$$

$$n = 25,5 \div (0,2082+0,1825) = 65$$

$$\mathbf{n = 65} \text{ (4-4)}$$

5.

En este caso:

$$n_1 = 14$$

$$A_1 = 0,8331 x (2)^{1/2}\text{mm}$$

$$B_1 = (25,4 - 14 x 1,1781) / 14 = 0,636 \text{ mm}$$

$$\mathbf{B_1 = 0,636\ mm} \text{ (4-5)}$$

EJERCICIO Nº 5

PREGUNTAS

1. Se denomina característica de una criba o tamiz (1), y en general, de una superficie cualquiera con orificios; a la superficie que estos representan con respecto a la superficie total, generalmente, expresada en (%).

En base a la definición anterior, calcular la característica del tamiz # 3; si el diámetro del alambre con que es fabricado este tamiz es de 1,802 mm y la luz de la malla es de 6,665 mm (ver Fig.5).

SOLUCION

1.

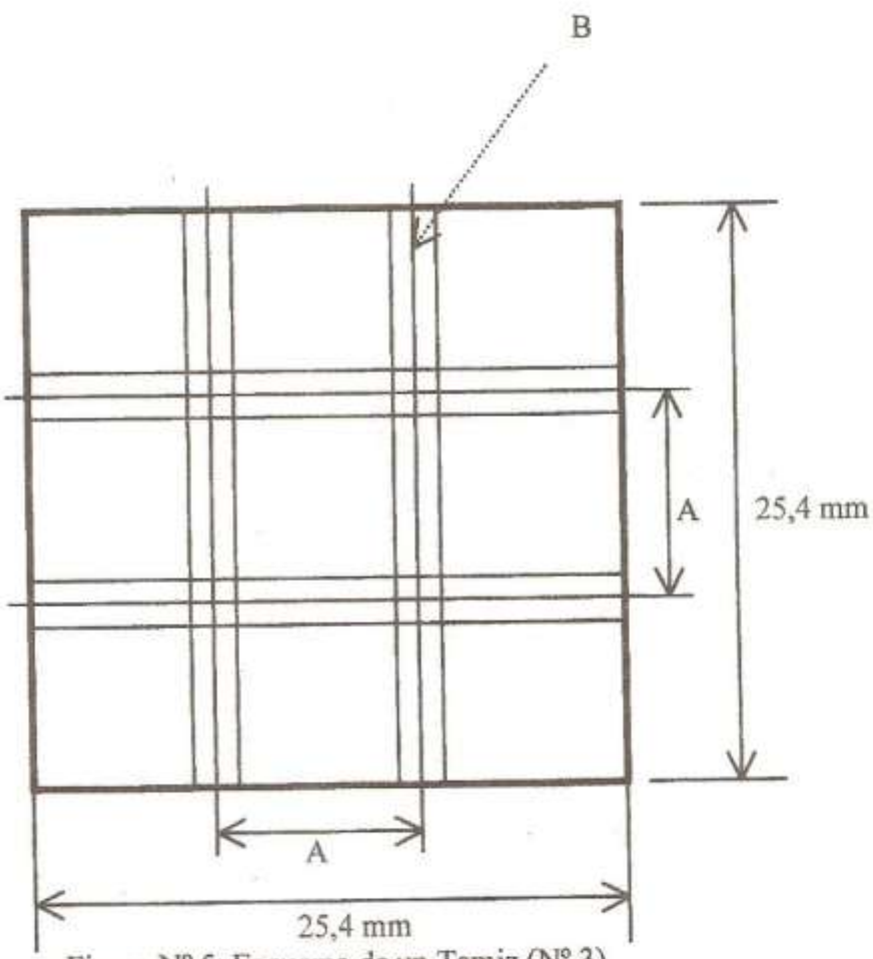


Figura N° 5: Esquema de un Tamiz (N° 3)

Sea:

S = superficie total (Fig.5)
S_1 = Superficie de los orificios
C = Característica
n = # del tamiz

Se cumple que :

$$C = \frac{S}{S_1} x100 = \frac{A^2.n^2}{(25,4)^2} \text{ x } 100 \qquad (9)$$

Dando valores a (9):

$C = (6,665)^2 x3^2 \div (25,4)^2 = 0,61969$

C = 62,0% (5-1)

EJERCICIO N° 6

En la Serie Normal Tyler, el tamiz 200 tiene una luz de malla de 0,0737 mm, y el alambre con que es fabricado tiene un diámetro de 0,0533 mm.

PREGUNTAS

1. Calcular el diámetro del alambre necesario para fabricar el tamiz # 14, si este se encuentra ubicado 8 posiciones por encima del # 200 (ver Figuras N°6 y 6').

2. Calcular la característica de este tamiz.
3. Comparar las características de estas dos mallas.

SOLUCION

6
8
10
14
20
28
35
48
65
100
150
200
270
Fondo

Figura Nº 6: Serie Normal de Tamices Tyler

1.
En la ecuación (8), nos piden calcular B (ver Fig. 6') conociendo n = 14, pero desconociendo A; la cual determinaremos con ayuda de la expresión (10):

$$A_p = A_0\left(\sqrt{2}\right)^p \qquad (10)$$

donde:

p = posición del tamiz r respecto del tamiz base

A_0= luz ó abertura del tamiz base (malla 200)

Así :

$$A = (0{,}0737)\left(\sqrt{2}\right)^8 = 1{,}1792 \text{ mm}$$

$$B = (25{,}4\text{-}nA)/n = (25{,}4 - 14\text{x}1{,}1792) \div 14 = 0{,}6351 \text{ mm}$$

B = 0,6351 mm (6-1)

2.
Para calcular la característica del tamiz de malla 14, utilizamos (9)

$$C_{14} = ((1{,}1792)^2\text{x}14\text{x}14 \div (25{,}4)^2)\text{x}100 = 42{,}24$$

C_{14} = 42,24% (6-2)

3.

$$C_{200} = ((0{,}0737)^2(200)^2 \div (25{,}4)^2)\text{x}100 = 33{,}86\%$$

$C_{200} < C_{14}$ (6-3)

La característica de un tamiz, disminuye a medida que aumenta el número del tamiz en virtud de que la luz se hace más pequeña con una razón geométrica de $(2)^{1/2}$ para tamices consecutivos.

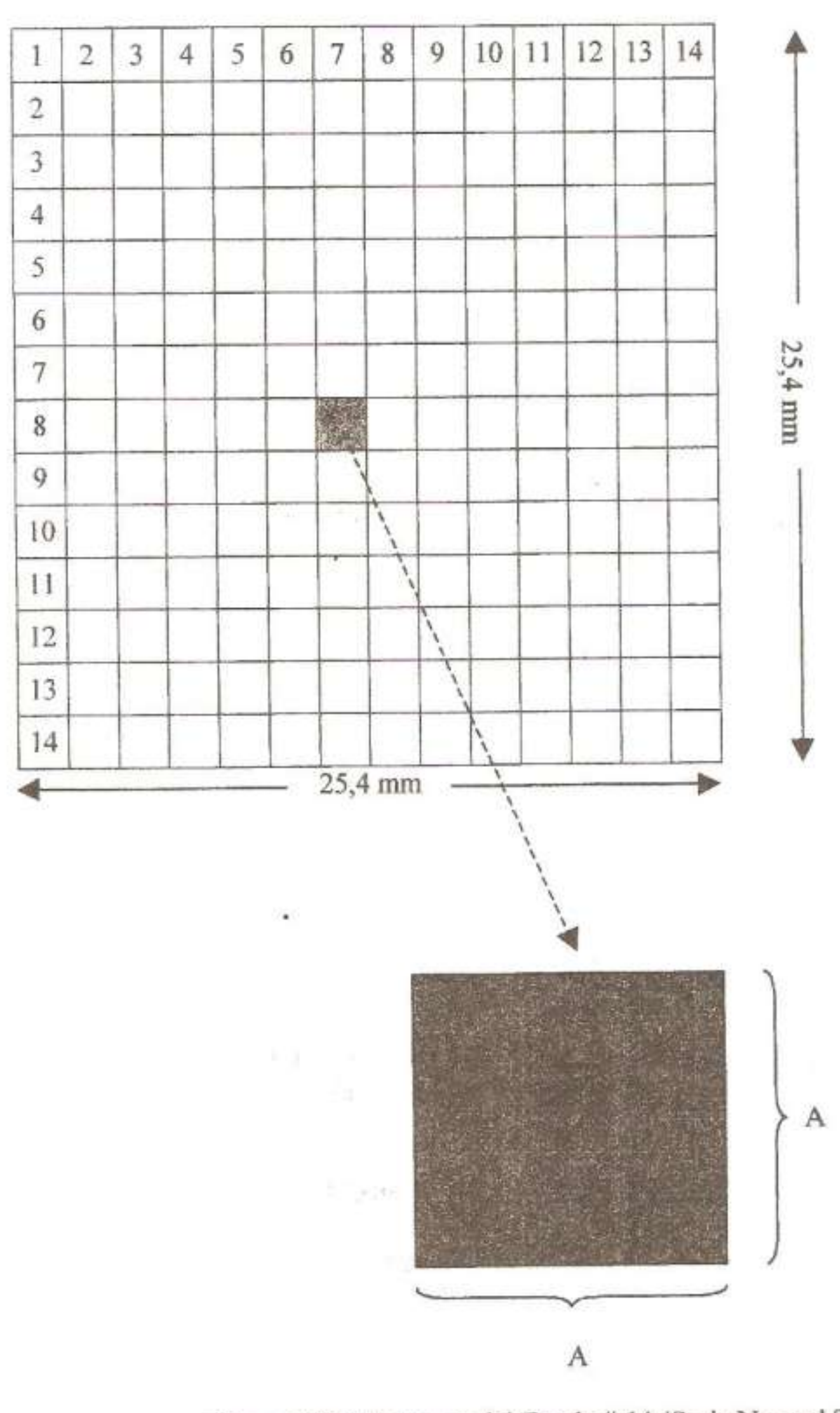


Figura N°6': Esquema del Tamiz # 14 (Serie Normal Tyler).

EJERCICIO Nº 7

La característica de un tamiz Tyler Normal, es de 61,95% y se encuentra 11 posiciones por encima del tamiz de malla 200 que tiene una luz de 0,0737 mm.

PREGUNTAS

1. Calcular la luz de dicho tamiz.
2. Determinar el número de mallas del tamiz.
3. Calcular el diámetro del alambre con que se ha de fabricar dicho tamiz.

SOLUCION

1.

Con la ayuda de (10), podemos calcular A, ya que conocemos A_0 = 0,0737 mm, y p = 11.

Así:

$A = 0{,}0737\ [(2)^{1/2}]^{11} = 3{,}335$

A = 3,335 mm (7-1)

2.

Para este cálculo, utilizamos la ecuación (9):

A = 3,335

C_n= 61,95%, así:

$n = [(0{,}6195x(25{,}4)^2/(3{,}335)^2]^{1/2} = 5{,}9945$

n = 6 (7-2)

3. En este caso, aplicamos (8):

A = 3,335 mm

n = 6

B = (25,4 – 6x3,335) ÷ 6 = 0,8983

B = 0,8983 mm (7-3)

EJERCICIO Nº 8

PREGUNTAS

1. A cuantas posiciones por encima del tamiz de malla 200, se encuentra un tamiz con 1,168 mm de luz en la Serie Tyler Normal ?.

2. La misma pregunta anterior, pero si el tamiz tiene de abertura 0,295 mm en la Serie Tyler Doble.

SOLUCION

1.

La Serie Tyler se caracteriza porque tiene como base el tamiz 200, con una luz de 0,0737 mm y además, las aberturas entre tamices consecutivos cambian con una razón geométrica de $(2)^{1/2}$en la Serie Normal; y con una razón de $(2)^{1/4}$ en la Serie Doble.

Para este cálculo vamos a utilizar la ecuación (10):

$$A_p = A_0\left(\sqrt{2}\right)^p$$

logaritmando y despejando:

$$p = \frac{LnA_p - LnA_0}{Ln\sqrt{2}}$$

$p = (\text{Ln } 1{,}168 - \text{Ln } 0{,}0737) / \text{Ln } (2)^{1/2} = 7{,}792$

p = 8 posiciones por encima del tamiz 200 (8-1)

2.

Para este caso, aplicamos la siguiente ecuación:

$$A_p = A_0\left(\sqrt[4]{2}\right)^p \qquad (11)$$

Sacando logaritmos y despejando:

$$p = \frac{LnA_p - LnA_0}{Ln\left(\sqrt[4]{2}\right)}$$

$$p = (\text{Ln } 0{,}295 - \text{Ln } 0{,}0737)/\text{Ln}(2)^{1/4} = 8$$

p = 8 posiciones por encima del tamiz de malla 200 en la Serie Tyler Doble (8-2)

EJERCICIO Nº 9

Los tamices número 8 y 35, se encuentran ubicados 10 posiciones por encima del tamiz 200, en las series Tyler Normal y Doble; respectivamente (Fig. 6)

PREGUNTAS

1. Comparar la luz de c/u de estos tamices.
2. Comparar los diámetros de los alambres con que son fabricados c/u de estos tamices.
3. Comparar las características de estos tamices.
4. A cuantas posiciones por debajo de la malla # 8, se encuentra ubicada la 35?.

SOLUCION

1.

Sea:

$A_{N,i}$ = luz del tamiz "i" en la Serie Tyler Normal

$A_{D,i}$ = luz del tamiz "i" en la Serie Tyler Doble

p = posición del tamiz, respecto al tamiz base (malla 200).

Aplicando (10):

$$A_{N,8} = 0{,}0737x[(2)^{1/2}]^{10} = 2{,}3684 \text{ mm}$$

Aplicando (11):

$$A_{D,35} = 0{,}0737x[(2)^{1/4}]^{10} = 0{,}4169 \text{ mm}$$

$\mathbf{A_{N,8} > A_{D,35}}$ (9-1)

2.

Reestructuremos le expresión (8) de la siguiente manera:

$$n_N A_N + n_N B_N = 25{,}4 \qquad (8.1)$$

$$n_D A_D + n_D B_D = 25{,}4 \qquad (8.2)$$

los subíndices N y D se refieren a las condiciones Normal y Doble, respectivamente., por tanto:

$$B_{N,8} = (25{,}4 - 8x2{,}3584)/8 = 0{,}8166 \text{ mm}$$

$$B_{D,35} = (25{,}4 - 35x0{,}4169)/35 = 0{,}3088 \text{ mm}$$

$\mathbf{B_N > B_D}$ (9-2)

3.

Utilizando (9):

$$C_8 = [(2{,}3584)^2x(8)^2/(25{,}4)^2]x100 = 55.18\%$$

$$C_{35} = [(0{,}4169)^2x(35)^2/(25{,}4)^2]x100 = 33{,}00\%$$

$\mathbf{C_8 > C_{35}}$ (9-3)

4.

En este caso, la malla 35 es la malla de referencia, por tanto, si adaptamos la ecuación (11), tendremos:

$$A_8 = A_{35}\{(2)^{1/4}\}^p$$

Logaritmando y despejando tendremos:

$$p = \frac{1}{Ln\sqrt[4]{2}} xLn\frac{2{,}3584}{0{,}4169} = 10$$

La malla 35, se encuentra 10 posiciones por debajo de la 8 en Serie Doble (9-4)

EJERCICIO Nº 10

En la serie de tamices inglesa I.M.M (Institution of Mining and Metallurgy), el # mesh se expresa en mallas por pulgada lineal de 25,4 mm.

En esta serie, el diámetro del alambre es igual a la luz de la malla y la superficie clasificadora es aproximadamente igual al 25% en todas las cribas y tamices.

PREGUNTAS

1. Calcular la luz de la malla para el tamiz # 5.
2. Calcular el # mesh para una malla de 0,2540 mm de luz.
3. Calcular la superficie clasificadora, para las mallas anteriores.

SOLUCION

1.

En este caso, la ecuación (8) se transforma, ya que A = B.

$nA + nB = 25,4 \therefore$

$2nA = 2nB = 25,4$ (12)

$A = 25,4/2n = 25,4/2x5 = 2,540$

$\mathbf{A = 2,540\ mm}$ (10-1)

2.

despejando de (12):

$n = 25,4/0,254 = 50$

$\mathbf{n = 50}$ (10-2)

3.

aplicando (9):

Caso (1.): $C_5 = \{(2,54)^2(5)^2/(25,4)^2\}x100 = \mathbf{25\%}$ (10-3)

Caso (2.): $C_{50} = (0,254)^2(50)^2/(25,4)^2x100 = \mathbf{25\%}$ (10-3)

EJERCICIO Nº 11

Para de serie de tamices U.S.Standard, que tiene como base el tamiz # 18 (1,00 mm de luz), la razón entre tamices consecutivos es $(2)^{1/4}$

PREGUNTAS

1. Calcular las aberturas para las mallas inmediatamente superior, e inmediatamente inferior a la malla 18.
2. Calcular las aberturas para las mallas ubicadas 5 posiciones por encima, y 5 posiciones por debajo de la malla 18.
3. A partir de la malla ubicada 5 posiciones por debajo, deducir la luz de la ubicada 5 posiciones por encima de la malla # 18.

SOLUCION

1.

Aplicando (11), y teniendo en cuenta que para la malla inmediatamente superior a la 18, p = 1 y para la inmediatamente inferior, p = -1, tendremos:

Para la malla inmediatamente superior:

$A_1 = 1,0x(2)^{1/4} = \mathbf{1,1892\ mm}$ (11-1)

Para la malla inmediatamente inferior:

$A_{-1} = 1/(2)^{1/4} = \mathbf{0,8409mm}$ (11-1)

2.

De nuevo aplicamos (11), para p = 5 y p = -5:

$A_5 = 1,0x(2)^{1/4} = \mathbf{2,3784\ mm}$ (11-2)

$A_{-5} = 1/[(2)^{1/4}]^5 = \mathbf{0,4204\ mm}$ (11-2)

3.
Aplicamos (10), tomando como referencia la malla 5 puestos por debajo de la 18, la expresión quedaría así:

$$A_5 = A_{-5}\{(2)^{1/4}\}^{10}$$

$$A_5 = 0{,}4204x\{(2)^{1/4}\}^{10} = \mathbf{2{,}3784\ mm}\ (11\text{-}3)$$

EJERCICIO Nº 12

PREGUNTAS

Elaborar una serie de tamices normalizada, utilizando para ella los datos siguientes:
1) Base de la serie, un tamiz con una luz de 1,0 mm.
2) Expresar el # de mallas por pulgada de 25,4 mm.
3)Utilizar como razón, la relación de densidades en el agua entre la calcopirita y el grafito.
4)El diámetro del alambre con que se fabrica un tamiz es igual a ¼ de la luz de la malla.

SOLUCION

Si:
R = razón = progresión geométrica = Relación de densidades en el agua:
d = densidad del grafito = 2,2 g/cm^3
D = densidad de la calcopirita = 4,2 g/cm^3:

$$R = \frac{D-1}{d-1} \qquad (13)$$

$$R = (4{,}2-1) \div (2{,}2-1) = 2{,}6667$$

Para una serie normalizada debe cumplirse (8).
Primero elaboramos la serie en sentido ascendente a partir de la base:
Tamiz base:

$$A = 1{,}0\ mm,\ B = 0{,}25\ mm$$
$$n_0 = 25{,}4/(A+B) = 25{,}4/(1+0{,}25) = 20{,}32 \cong 20$$

La expresión (10), toma ahora la forma:

$$A_p = A_0 R^p \qquad (14)$$

Si p = 1:

$$A_1 = 1{,}0x(2{,}6667)^1 = 2{,}6667\ mm$$
$$B_1 = 0{,}25x2{,}6667 = 0{,}6667\ mm$$
$$n_1 = 25{,}4/(2{,}6667+0{,}6667) = 7{,}62 \cong 8$$

Si p = 2:

$$A_2 = 1{,}0x(2{,}6667)^2 = 7{,}1113\ mm$$
$$B_2 = 7{,}1113x0{,}25 = 1{,}7778\ mm$$
$$n_2 = 25{,}4/(7{,}1113+1{,}7778) = 2{,}86 \cong 3$$

Si p = 3:

$$A_3 = 1{,}0x(2{,}6667)^3 = 18{,}9637\ mm$$
$$B_3 = 0{,}25x18{,}9637 = 4{,}741\ mm$$
$$n_3 = 25{,}4/(18{,}9637+4{,}741) = 1{,}07 \cong 1$$

Si p = 4:

$$A_4 = 1{,}0x(2{,}6667)^4 = 50{,}5705\ mm$$
$$B_4 = 0{,}25x50{,}5705 = 12{,}6426\ mm$$
$$n_4 = 25{,}4/(50{,}5705+12{,}8426 = 0{,}4$$

Serie en sentido decreciente a partir de la base:
Si p = -1:

$$A_{-1} = 1{,}0x(2{,}6667)^{-1} = 0{,}375\ mm$$
$$B_{-1} = 0{,}25x0{,}375 = 0{,}09375\ mm$$
$$n_{-1} = 25{,}4/(0{,}375+0{,}09375) = 54{,}2 \cong 54$$

Si p = -2:

$A_{-2} = 1,0x(2,6667)^{-2} = 0,1406$ mm
$B_{-2} = 0,25x0,1406 = 0,0352$ mm
$n_{-2} = 25,4/(0,1406+0,0352) = 144,5 \cong 155$

Si p = -3:

$A_{-3} = 1,0x(2,6667)^{-3} = 0,0527$ mm
$B_3 = 0,25x0,0527 = 0,0132$ mm
$n_{-3} = 25,4/(0,0527+0,0132) = 385,5 \cong 386$

Los valores que se acaban de calcular, aparecen en la tabla siguiente:

SERIE DE CRIBAS Y TAMICES NORMALIZADA

Tamiz N°	LUZ DE LA MALLA			Diámetro del alambre (mm)
	Pulgadas	(mm)	Micras ($mmx10^{-3}$)	
0,4	1,9910	50,5705		12,6426
1	0,7466	18,9637		4,7409
3	0.2800	7,1113		1,7778
8	0,1050	2,6667		0,6667
20	0,0394	1,0000	1000	0,2500
54	0,0148	0,375	375	0,0938
145	0,0055	0,1406	140,6	0,0352
386	0,0026	0,0527	52,7.	0,0132

EJERCICIO N° 13

PREGUNTAS

Elaborar una serie de tamices normalizada con su complementaria, utilizando para ello los siguientes datos:

1) Base de la serie, un tamiz con una luz de 0,50 mm.

2) Expresar el número del tamiz, en mallas por pulgada inglesa (25,4 mm).

3) Utilizar como razón para la progresión geométrica, la relación de densidades en el agua entre la calcopirita (4,2) y el cuarzo (2,65).

4) El diámetro del alambre con que se fabrica el tamiz, es igual a ¼ de la luz de la malla.

SOLUCION

Este ejercicio es similar al # 12, con la diferencia de que se solicita adicionar una serie complementaria. Por lo tanto, para la serie normal procedemos del mismo modo que en el ejercicio anterior; apoyados en las expresiones (8) , (13) y (14):

Serie normalizada:

De acuerdo con (13):

R = progresión geométrica = (D-1)/(d-1) = (4,2-1)/(2,65-1) = 1,9394

Para el tamiz base, y aplicando (14) y (8):

Si p = 0:

$A_0 = 0,50$ mm
$B_0 = 0,25x0,5 = 0,125$ mm
$n_0 = 25,4/(0,5+0,125) = 40,64 \cong 41$

Serie normalizada creciente:

Si p = 1:

$A_1 = 0,5x(1,9394)^1 = 0,9697$ mm
$B_1 = 0,25x0,9697 = 0,2424$ mm
$n_1 = 25,4/(0,9697+0,2424) = 20,95 \cong 21$

Si p = 2:

$A_2 = 0,5x(1,9394)^2 = 1,8806$ mm
$B_2 = 0,25x1,8806 = 0,4702$ mm
$n_2 = 25,4/(1,8806+0,4702) = 10,8 \cong 11$

De esta misma manera se realizaron los cálculos para el resto de los tamices en la serie ascendentes que aparecen en la tabla.

Serie normalizada decreciente:

Si p = -1:

$A_{-1} = 0,5x(1,9394)^{-1} = 0,2578$ mm
$B_{-1} = 0,25x0,2578 = 0,0645$ mm
$n_{-1} = 25,4/(0,2578+0,0645) = 78,8 \cong 79$

Si p = -2:

$A_{-2} = 0,5x(1,9394)^{-2)} = 0,1329$ mm
$B_{2} = 0,25x0,1329 = 0,0332$ mm
$n_{-2} = 25,4/(0,1329+0,0332) = 152,9 \cong 153$

De esta misma manera, se realizaron los demás cálculos para el resto de la serie de tamices decrecientes que aparecen en la tabla.

Serie intermedia ó complementaria:

En este caso, la expresión (14) toma la siguiente forma:

$$A_f = A_0R^f \qquad (15)$$

Donde:

$$f = p+A_0 \qquad (16)$$

f = posición complementaria de "p"

Serie complementaria creciente:

Si p = 0., f = 0,5:

$A_{0,5} = 0,5x(1,9394)^{0,5} = 0,6963$ mm
$B_{0,5} = 0,25x0,6963 = 0,1741$ mm
$n_{0,5} = 25,4/(0,6963+0,1741) = 29,18 \cong 29$

Si p = 1, f = 1,5:

$A_{1,5} = 0,5x(1,9394)^{1,5} = 1,3504$ mm
$B_{1,5} = 0,25x1,3504 = 0,3376$ mm
$n_{1,5} = 25,4/(1,3504+0,3376) = 15$

Las demás posiciones complementarias crecientes de la serie, fueron determinadas de manera similar.

Serie complementaria decreciente:

Si p = -1, f = -0,5:

$A_{-0,5} = 0,5x(1,9394)^{-0,5} = 0,3590$ mm
$B_{-0,5} = 0,25x0,3590 = 0,0898$ mm
$n_{-0,5} = 25,4/(0,3590+0,0898) = 56,6 \cong 56\ ½$

Si p = -2, f = -1,5:

$A_{-1,5} = 0,5x(1,9394)^{-1,5} = 0,1851$ mm
$B_{-1,5} = 0,25x0,1851 = 0,0463$ mm
$n_{-1,5} = 25,4/(0,1851+0,0463) = 109,8 \cong 110$

Si p = -3, f = -2,5:

$A_{-2,5} = 0,5x(1,9394)^{-2,5} = 0,0955$ mm
$B_{-2,5} = 0,25x0,0955 = 0,0239$ mm
$n_{-2,5} = 24,4/(0,0955+0,0239) = 212,8 \cong 213$

Si p = -4, f = -3,5:

$A_{-3,5} = 0,5x(1,9394)^{-3,5} = 0,0492$ mm
$B_{-3,5} = 0,25x0,0492 = 0,0123$ mm
$n_{-3,5} = 25,4/(0,0492+0,0123) = 413$

Los valores calculados, aparecen en la tabla que se muestra a continuación:

SERIE DE CRIBAS Y TAMICES NORMALIZADA CON SU COMPLEMENTARIA

Malla N°	LUZ DE LA MALLA			Diámetro del Alambre (mm)
	Pulgadas	(mm)	Micras(mm/1000)	
				3,4295
1 ½	0,5401	13,7181		2,4627
2	0,3878	9,8508		1,7683
3	0,2785	7,0734		1,2698
4	0,2000	5,0793		0,9118
6	0,1436	3,6472		0,6548
7 ¾	0,1032	2,6190		0,4702
11	0,0740	1,8806		0,3376
15	0,0532	1,3504		0,2424
21	0,0382	0,9697	969,7	0,1741
29	0,0274	0,6963	696,3	0,2500
41	0,0197	0,5000	500,0	0,0898
56 ½	0,0141	0,3590	359,0	0,0645
79	0,0101	0,2578	257,8	0,0463
110	0,0073	0,1851	185,1	0,0332
153	0,0052	0,1329	132,9	0,0239
213	0,0038	0,0955	95,5	0,0171
296 ½	0,0027	0,0685	68,5	0,0123
413	0,0019	0,0492	49,2	0,0088
576	0,0014	0,0353	35,3	

EJERCICIO N° 14

PREGUNTAS

Elaborar una serie de tamices normalizada, utilizando para ello las condiciones siguientes:

1) La base de la serie es un tamiz de 150 mallas por pulgada lineal (25,4 mm).
2) Utilizar una progresión geométrica, cuya razón sea (Ln 3).
3) El diámetro del alambre con que se fabrica el tamiz, es igual al 75% de la luz de la malla.

SOLUCION

Para este ejercicio, utilizaremos las ecuaciones (8) y (14): Los datos de que se dispone son:

$R = \text{Ln } 3$
$B = 0{,}75A$
$n_0 = 150$

Para el tamiz base, con la ayuda de (8):

$150A_0 + 150x0{,}75A_0 = 25{,}4 \therefore$
$A_0 = 25{,}4/(150x1{,}75) = 0{,}0968$ mm
$B_0 = 0{,}0968x0{,}75 = 0{,}0726$ mm

Combinando (8) y (14), determinamos la serie normal ascendente:

Si p = 1:

$A_1 = 0{,}0968x(\text{Ln } 3)^1 = 0{,}1063$ mm
$B_1 = 0{,}75xo{,}1063 = 0{,}0798$ mm
$n_1 = 25{,}4/(0{,}1063+0{,}0798) = 136{,}54 \cong 136\ ½$

Si p = 2:

$A_2 = 0{,}0968x(\text{Ln } 3)^2 = 0{,}1168$ mm
$B_2 = 0{,}75x0{,}1168 = 0{,}0876$ mm
$n_2 = 25{,}4/(0{,}1168+0{,}0876) = 124{,}27 \cong 124y1/3$

De este mismo modo se realizan los cálculos para las demás celdas que constituyen la escala ascendente de la serie, y que aparecen en la tabla

Combinando de nuevo (8) y (14), determinamos la serie normal descendente:

Si p = -1:

$A_{-1} = 0{,}0968x(\text{Ln } 3)^{-1} = 0{,}0881$ mm

$B_1 = 0{,}75x0{,}0881 = 0{,}0661$ mm

$n_1 = 25{,}4/(0{,}0881+0{,}0661) = 164{,}73 = 164y8/11$

Si p = -2:

$A_{-2} = 0{,}0968x(\text{Ln}3)^{-2} = 0{,}0802$ mm

$B_{-2} = 0{,}75x0{,}0802 = 0{,}0602$ mm

$n_{-2} = 25{,}4/(0{,}0802+0{,}0602) = 180{,}97 \cong 181$

De esta misma manera, se procedió al cálculo de todos los demás valores de la serie descendente de tamices, y que aparecen la siguiente tabla:

SERIE DE TAMICES NORMALIZADA CON UNA RAZON = Ln 3

N° de malla	LUZ DE LA MALLA			Diámetro del alambre (mm)
	Pulgadas	(mm)	Micras(mm/1000)	
40 1/5	0,0142	0,3612	361,2	0,2709
44 1/6	0,0129	0,3287	328,7	0,2466
48 ½	0,0118	0,2992	299,2	0,2244
53 1/3	0,0107	0,2724	272,4	0,2043
58 3/5	0,0098	0,2479	247,9	0,1859
64 1/3	0,0089	0,2257	225,7	0,1693
70 2/3	0,0081	0,2054	205,4	0,1541
77 5/8	0,0074	0,1870	187,0	0,1402
85 1/3	0,0067	0,1702	170,2	0,1276
93 2/3	0,0061	0,1549	154,9	0,1162
103	0,0056	0,1410	141,0	0,1058
113	0,0051	0,1284	128,4	0,0963
124 1/3	0,0046	0,1168	116,8	0,0876
136 ½	0,0042	0,1063	106,3	0,0798
150	0,0038	0,0968	96,8	0.0726
164 8/11	0,0035	0,0881	88,1	0,0661
181	0,0032	0,0802	80,2	0,0602
198 5/6	0,0029	0,0730	73,0	0,0548
218 3/7	0,0026	0,0665	66,5	0,0498
240	0,0024	0,0605	60.5	0,0454

CARACTERISTICAS

1) Preferiblemente para clasificación de finos.
2) No necesita serie complementaria.
3) Se puede seleccionar la sub-serie que se desee, con solo elevar el valor de "A" a una potencia igual al número de tamices que se busque saltar para establecer una normalidad con una nueva razón: por ejemplo, si se desea seleccionar una sub-serie cada 3 tamices tomando una base cualquiera (por ejemplo el # 240), establezco una nueva razón = $(\text{Ln } 3)^3$, así, el tamiz siguiente sería $0{,}0605x(\text{Ln } 3)^3 = 0{,}0802$ mm de luz que equivale al # 181 de la serie, y el siguiente sería $0{,}0802x(\text{Ln } 3)^3 = 0{,}1063$ mm de luz (malla # 136 ½), y así sucesivamente.
4) Aplicando las expresiones (8) y (14), esta serie se puede proyectar indefinidamente de manera creciente o decreciente, lo cual le proporciona una gran versatilidad; pues la vuelve aplicable para granulometría gruesa ó fina.(V.g. n = 1.4/11, B = 8,0013 mm y A = 10,6684 mm para una malla gruesa).
5) Con la aplicación de esta tabla, se pueden realizar análisis granulométricos con gran precisión, en virtud de que la diferencia en la luz de mallas consecutivas, en muy pequeña (menor que en la series convencionales).

CAPITULO II

CONCENTRACION

EJERCICIO Nº 1

Granos esféricos de calcopirita (4,2) y grafito (2,2) tienen diámetros de 1 y 14 mm (los números entre paréntesis representan las densidades). Utilizando la ecuación de Ritter Von Rittinger, para la velocidad de caída límite de granos en el agua:

PREGUNTAS

1. Las velocidades de caída límite para cada uno de estos minerales
2. ¿Cuales serán los tamaños de los granos de calcopirita, isódromos con los de grafito para los diámetros dados?
3. ¿Cuales serán los tamaños de los granos de grafito, isódromos con los de calcopirita para los diámetros dados?
4. ¿Cual será la velocidad de caída límite de los granos de calcopirira determinados en (2.)?
5. ¿Cual será la velocidad de caída límite de los granos de grafito determinados en (3.)?

SOLUCION

1.

Ecuación de Ritter Von Rittinger:

$$V = K\sqrt{\frac{D-\rho}{\rho}L} \qquad (1)$$

donde:

K = constante = 5,11 para granos esféricos
V = velocidad de caída límite
D = densidad del mineral
ρ = densidad del fluido = 1 cuando se trata del agua.
L = tamaño del grano

Cuando se trata del agua (1) y los granos son esféricos, (1) se convierte en:

$$V = 5,11\sqrt{L(D-1)} \qquad (2)$$

Para el grafito, con diámetros de 1 y 14 mm:

$V_1 = 5,11x[(1x(2,2-1)]^{1/2} = 5,5977 \cong$ **5,6 mm/seg.** (1-1)
$V_2 = 5,11x[(14x(2,2-1)]^{1/2} =$ **20,94 mm/seg.** (1-1)

Para la calcopirita con diámetros de 1 y 14 mm:

$V_1 = 5,11x[(1x(4,2-1)]^{1/2} =$ **9,141 mm/seg** (1-1)
$V_2 = 5,11x[(14x(4,2-1)]^{1/2} =$ **34,20 mm/seg.** (1-1)

2.

Si:

d = densidad del grafito
L = tamaño del grano del grafito
D = densidad de la calcopirita
l = tamaño del grano de la calcopirita
V_M = velocidad de caída límite para granos esféricos en agua en reposo

$V_{C(g)} = 5,11\{(L(d-1)\}^{1/2}$
$V_{cal.} = 5,11\{(l(D-1)\}^{1/2}$

Serán isódromos si:

$V_{C(g)} = V_{calc,}$, es decir:
$5,11x\{(L(d-1)\}^{1/2} = 5,11x\{(lx(D-1)\}^{1/2} \therefore$

tamaño de grano de calcopirita, isódromo al de grafito:

$l = L(d-1)/(D-1)$ (3)

Cuando el grano de grafito, tiene un diámetro = 1,0 mm:

$l = 1x(2,2-1)/(4,2-1) =$ **0,375 mm** (1-2)

Cuando el grano de grafito, tiene un diámetro de 14,0 mm:

$l = 14(2,2-1)/(4,2-1) =$ **5,25 mm** (1-2)

3.

Para determinar los granos de grafito, isódromos con los de calcopirita, volvemos a utilizar (3):

$L = l(D-1)/d-1)$:

Cuando el grano de calcopirita, tiene un diámetro de 1,0 mm:

$L = 1x(4{,}2-1)/(2{,}2-1) =$ **2,67 mm** (1-3)

Cuando grano de calcopirita, tiene un diámetro de 14,0 mm:

$L = 14x(4{,}2-1)/(2{,}2-1) =$ **37,34 mm** (1-3)

4.

La velocidad de caída límite de los granos de calcopirita, isódromos con los de grafito, será:

$V_1 = 5{,}11x[(0{,}375(4{,}2-1)]^{1/2} =$ **5,6 mm/seg** (1-4)

$V_2 = 5{,}11x[(5{,}25(4{,}2-1)]^{1/2} =$ **20,94 mm/seg** (1-4)

5.

La velocidad de caída límite de los granos de grafito, isódromos con los de calcopirita, será:

$V_1 = 5{,}11x[(2{,}67(2{,}2-1)]^{1/2} =$ **9,15 mm/seg** (1-5)

$V_2 = 5{,}11x[(37{,}34(2{,}2-1)]^{1/2} =$ **34,20 mm/seg** (1-5)

Como se puede observar, un grano de grafito que tenga 1,0 mm de diámetro; caerá en el agua en reposo con la misma velocidad que uno de calcopirita con un diámetro de 0,375 mm. Igual ocurre para un grano de grafito de 14,0 mm y otro de calcopirita con 5,25 mm de diámetro. Todo esto es debido al factor densidad.

EJERCICIO Nº 2

Al reducir de tamaño una muestra de un mineral de calcopirita, se producen en igual proporción granos esféricos puros de calcopirita (4,2) y grafito (2,2); así como mixtos de calcopirita y grafito, en los cuales se determinó por análisis que ¼ de su peso era grafito.

Los diámetros de los granos producidos, fueron en promedio 1 y 14 mm.

Los números entre paréntesis representan las densidades.

PREGUNTAS

1. Calcular la densidad de los granos de mixtos.
2. Calcular la velocidad de caída límite para cada una de las especies (calcopirita, grafito y mixtos), con los tamaños de grano mencionados.
3. Cuales serán los tamaños de grano de calcopirita, isódromos con los de mixtos?
4. Cuales serán los tamaños de grano de grafito, isódromos con los de mixto?
5. Cuales serán los tamaños de grano del mixto, isódromos con los de calcopirita?
6. Cuales serán los tamaños de grano del mixto, isódromos con los de grafito?
7. Cuales serán las velocidades de caída límita de los granos del mixto, determinados en (5)?
8. Cual será la velocidad de caída límite de los granos del mixto, determinados en (6)?

SOLUCION

1.

Supongamos 1,0 gramos de mixto:

Peso de calcopirita en el mixto = 1,0x3/4 = 0,75 g

Peso del grafito en el mixto = 1,0x1/4 = 0,25 g

Para determinar el volumen de 1,0 g de mixto, utilizamos la expresión:

$$D = \frac{W}{v} \qquad (4)$$

Donde:

D = densidad, W = peso, v = volumen

$v_{calc.} = 0{,}75/4{,}2 =$ 0,1786 cm^3

$v_{C(g)} = 0{,}25/2{,}2 =$ <u>0,1136 cm^3</u>

v (1 gramo de mixto) = 0,2922 cm^3

Densidad del mixto = 1/0,2922 = 3,422 g/cm³ (2-1)

2.

Para este cálculo, aplicamos la ecuación (2):

Los valores para la calcopirita y el grafito, ya fueron calculados en el ejercicio # 1 como (9,141 y 34,20 mm/seg) y (5,6 y 20,94 mm/seg), respectivamente.

Para el mixto serían:

$$\mathbf{V_1 = 5{,}11x\{(1{,}0(3{,}422\text{-}1)\}^{1/2} = 7{,}95\ mm/seg.}\ (2\text{-}2)$$
$$\mathbf{V_2 = 5{,}11x\{(14(3{,}422\text{-}1)\}^{1/2} = 29{,}76\ mm/seg.}\ (2\text{-}2)$$

3.

Sea:

d^1 = densidad del mixto = 3,422 g/cm^3

L^1 = diámetrl de grano del mixto = 1 y 14 mm

Para encontrar los granos de calcopirita isódromos con los de mixto, la ecuación (3) toma la forma: $l = L^1(d^1\text{-}1)/(D\text{-}1)$, así:

$$\mathbf{l_1 = 1{,}0x(3{,}422\text{-}1)/(4{,}2\text{-}1) = 0{,}757\ mm}\ (2\text{-}3)$$
$$\mathbf{l_2 = 14x(3{,}422\text{-}1)/(4{,}2\text{-}1) = 10{,}6\ mm}\ (2\text{-}3)$$

4.

Para encontrar los granos de grafito isódromos con los de mixto, la ecuación (3) toma la forma : $L = L^1(d^1\text{-}1)/(d\text{-}1)$, así:

$$\mathbf{L_1 = 1{,}0x(3{,}422\text{-}1)/(2{,}2\text{-}1) = 2{,}02\ mm}\ (2\text{-}4)$$
$$\mathbf{L_2 = 14x(3{,}422\text{-}1)/(2{,}2\text{-}1) = 28{,}26\ mm}\ (2\text{-}4)$$

5.

Para encontrar los granos de mixto isódromos con los de calcopirita, la ecuación (3) toma la forma: $L^1 = l(D\text{-}1)/(d^1\text{-}1)$, así:

$$\mathbf{L^1{}_1 = 1{,}0x(4{,}2\text{-}1)/(3{,}422\text{-}1) = 1{,}32\ mm}\ (2\text{-}5)$$
$$\mathbf{L^1{}_2 = 14x(4{,}2\text{-}1)/(3{,}422\text{-}1) = 18{,}50\ mm}\ (2\text{-}5)$$

6.

Para encontrar los granos de mixto isódromos con los de grafito, la ecuación (3) toma la forma: $L^1 = L(d\text{-}1)/(d^1\text{-}1)$, así:

$$\mathbf{L^1{}_1 = 1{,}0x(2{,}2\text{-}1)/(3{,}422\text{-}1) = 0{,}50\ mm}\ (2\text{-}6)$$
$$\mathbf{L^1{}_2 = 14x(2{,}1\text{-}1)/(3{,}422\text{-}1) = 6{,}94\ mm}\ (2\text{-}6)$$

7.

Para determinar las velocidades de caída límite de los granos de mixto calculados en (5.), utilizamos la expresión (2), así:

$$\mathbf{V_1 = 5{,}11x[(1{,}32(3{,}422\text{-}1)]^{1/2} = 9{,}14\ mm/seg.}\ (2\text{-}7)$$
$$\mathbf{V_2 = 5{,}11x[(18{,}50(3{,}422\text{-}1)]^{1/2} = 34{,}20\ mm/seg.}\ (2\text{-}7)$$

8.

Para determinar las velocidades de caída límite de los granos de mixto calculados en (6.), utilizamos la expresión (2), así:

$$\mathbf{V_1 = 5{,}11x[(0{,}50(3{,}422\text{-}1)]^{1/2} = 5{,}62\ mm/seg.}\ (2\text{-}8)$$
$$\mathbf{V_2 = 5{,}11x[(6{,}94(3{,}422\text{-}1)]^{1/2} = 20{,}95\ mm/seg.}\ (2\text{-}8)$$

EJERCICIO Nº 3

PREGUNTAS

1. Utilizando la ecuación de Rittinger, determinar la velocidad de caída límite (en agua en reposo), para granos redondeados, alargados y laminares; en una muestra que contiene calcopirita (4,2), grafito (2,2) y mixtos de estos (3,422), siendo en todos los casos; las dimensiones medias de los granos 1,0 y 14,0 mm.

2. Calcular la velocidad de caída límite, en el supuesto de que 50% de los granos son redondos, 25% son alargados y 25% son laminares.

SOLUCION

1.

La ecuación (2), de Rittinger es: $V = K.[(L(d\text{-}1)]^{1/2}$. En esta expresión, la constante "K" depende de la forma, y es lo que se trata de ejercitar aquí:

Para granos redondeados:

Calcopirita:

$V_1 = 3,2.\{(1x(4,2\text{-}1)\}^{1/2} = 5,72$ **mm/seg.** (3-1)
$V_2 = 3,2\{(14(4,2\text{-}1)\}^{1/2} = 21,42$ **mm/seg.** (3-1)

Grafito:

$V_1 = 3,2\{(1x(2,2\text{-}1)\}^{1/2} = 3,52$ **mm/seg** (3-1)
$V_2 = 3,2\{(14(2,2\text{-}1)\}^{1/2} = 13,58$ **mm/seg.** (3-1)

Mixtos:

$V_1 = 3,2\{(1x((3,422\text{-}1)\}^{1/2} = 4,98$ **mm/seg.** (3-1)
$V_2 = 3,2\{(14(3,422\text{-}1)\}^{1/2} = 18.63$ **mm/seg.** (3-1)

Para granos alargados:
Calcopirita:

$V_1 = 2,65\{(1x(4,2\text{-}1)\}^{1/2} = 4,74$ **mm/seg.** (3-1)
$V_2 = 2,65\{(14(4,2\text{-}1)\}^{1/2} = 17,74$ **mm/seg.** (3-1)

Grafito:

$V_1 = 2,65\{(1x(2,2\text{-}1)\}^{1/2} = 2,91$ **mm/seg.** (3-1)
$V_2 = 2,65\{(14(2,2\text{-}1)\}^{1/2} = 11,25$ **mm/seg.** (3-1)

Mixtos:

$V_1 = 2,65\{(1x(3,422\text{-}1)\}^{1/2} = 4,12$ **mm/seg.** (3-1)
$V_2 = 2,65\{(14(3,422\text{-}1)\}^{1/2} = 15,43$ **mm/seg.** (3-1)

Para granos laminares:
Calcopirita:

$V_1 = 2,25\{(1x(4,2\text{-}1)\}^{1/2} = 4,02$ **mm/seg.** (3-1)
$V_2 = 2,25\{(14(4,2\text{-}1)\}^{1/2} = 15,06$ **mm/seg.** (3-1)

Grafito:

$V_1 = 2,25\{(1x(2,2\text{-}1)\}^{1/2} = 2,46$ **mm/seg.** (3-1)
$V_2 = 2,25\{(14(2,2\text{-}1)\}^{1/2} = 9,22$ **mm/seg.** (3-1)

Mixtos:

$V_1 = 2,25\{(1x(3,422\text{-}1)\}^{1/2} = 3,50$ **mm/seg.** (3-1)
$V_2 = 2,25\{(14(3,422\text{-}1)\}^{1/2} = 13,10$ **mm/seg.** (3-1)

2.
Para este caso:

K = 3,2x0,5 + 2,65x0,25 + 2,25x0,25 = 2,825; Así:

Para calcopirita:

$V_1 = 2,825\{(1x(4,2\text{-}1)\}^{1/2} = 5,05$ **mm/seg.** (3-2)
$V_2 = 2,285\{(14(4,2\text{-}1)\}^{1/2} = 18,91$ **mm/seg.** (3-2)

Para grafito:

$V_1 = 2,825\{(1x(2,2\text{-}1)\}^{1/2} = 3,09$ **mm/seg.** (3-2)
$V_2 = 2,825\{(14(2,2\text{-}1)\}^{1/2} = 11,58$ **mm/seg.** (3-2)

Para los mixtos:

$V_1 = 2,825\{(1x(3,422\text{-}1)\}^{1/2} = 4,40$ **mm/seg.** (3-2)
$V_2 = 2,285\{(14(3,422\text{-}1)\}^{1/2} = 16,45$ **mm/seg.** (3-2)

EJERCICIO N° 4

Suponer una muestra que contiene granos redondeados, alargados y laminares, de calcopirita (4,2), de grafito (2,2) y de mixtos (3,522); y que los diámetro de los orificios de las cribas que se utilizan para calibrarlos son 1,0 y 14 mm.

PREGUNTAS

1. La velocidad de caída límite de estos granos en agua en reposo, utilizando la ecuación (2), de Rittinger.
2. Suponiendo que en la muestra, 50% de los granos son redondos, 25% alargados y 25% laminares; calcular la velocidad límite.

SOLUCION

La solución a las solicitudes de este ejercicio con la asistencia de la ecuación (2), se logra utilizando el mismo mecanismo desarrollado en el ejercicio # 3.

La única diferencia radica en las consideraciones realizadas a Los valores de la constante "K", y que se muestran en el cuadro siguiente:

CONSIDERACIONES A LA CONSTANTE "K" (1)

FORMA DEL GRANO	VALORES DE "K"	
	1ª	2ª
Redondeados	3,20	2,73
Alargados	2,65	2,37
Laminares	2,25	1,92

La columna 1ª de la tabla anterior, se utiliza cuando se toma como diámetro la dimensión media de los granos (caso Ejercicio # 3); y la 2ª cuando se hace referencia al diámetro de los orificios de la criba o tamiz que sirven para calibrarlos. Con estas consideraciones, se obtuvieron los resultados siguientes:

1.

Granos redondeados (utilizando de 2ª columna):

Calcopirita:

V_1 = 4,88 mm/seg. (4-1)
V_2 = 18,27 mm/seg. (4-1)

Grafito:

V_1 = 2,99 mm/seg. (4-1)
V_2 = 11,19 mm/seg. (4-1)

Mixtos:

V_1 = 4,25 mm/seg. (4-1)
V_2 = 15,90 mm/seg. (4-1)

Granos alargados:

Cacopirita:

V_1 = 4,24 mm/seg. (4-1)
V_2 = 15,86 mm/seg. (4-1)

Grafito:

V_1 = 2,60 mm/seg. (4-1)
V_2 = 9,71 mm/seg. (4-1)

Mixtos:

V_1 = 3,69 mm/seg. (4-1)
V_2 = 13,80 mm/seg. (4-1)

Granos laminares:

Calcopirita:

V_1 = 3,43 mm/seg. (4-1)
V_2 = 12,85 mm/seg. (4-1)

Grafito:

V_1 = 2,10 mm/seg. (4-1)
V_2 = 7,87 mm/seg. (4-1)

Mixtos:

V_1 = 2,99 mm/seg. (4-1)
V_2 = 11,18 mm/seg. (4-1)

2.

Para este caso, hay que calcular "K", en función de la distribución porcentual de los granos:

$$K = 2{,}73x0{,}5 + 2{,}37x0{,}25 + 1{,}92x0{,}25 = 2{,}44$$

(este valor de K es el más utilizado).

Las velocidades límites determinadas con esta constante, resultan ser:

Calcopirita:

V_1 = 4,36 mm/seg. (4-2)
V_2 = 16,33 mm/seg. (4-2)

Grafito:

V_1 = 2,67 mm/seg. (4-2)
V_2 = 10,00 mm/seg. (4-2)

Mixtos:

V_1 = 3,80 mm/seg. (4-2)
V_2 = 14,21 mm/seg. (4-2)

EJERCICIO N° 5

En operaciones de concentración por gravedad, la fórmula de Rittinger solo es aplicable hasta un determinado tamaño mínimo, porque no toma en cuenta la viscosidad (1). Para continuar con el modelo de Rittinger, pero tomando en cuenta la viscosidad; aparece la expresión de Stokes para tamaños pequeños:

Ley de Stokse: $474\ L^2\ (D-1)^{1/2}$ (5)

Según Allen, esta ley deja de ser aplicable a partículas cuyo diámetro sea mayor que el determinado en mm. Por la expresión:

$$L = \frac{0{,}1692}{\sqrt[3]{D-1}} \qquad (6)$$

PREGUNTAS

1. Calcular los tamaños máximos a los que se aplica la Ley de Stokes, para las siguientes especies:

Calcopirita (4,2)
Grafito (2,2)
Mixtos de estos (3,422)
Cinabrio = HgS (8,1)
Cuarzo (2,65)
Sal de Epsom = $MgSO_4.7H_2O$ (1,7)
Oro (19,3)

Los números entre paréntesis, representan las densidades.

SOLUCION

1.

Aplicando (6) a cada una de las especies mencionadas, tendremos:

Calcopirita:

L = 0,1692 / (4.2-1)$^{1/3}$ = 0,115 mm (1-1)

Grafito:

L = 0,1692 / (2,2-1)$^{1/3}$ = 0,159 mm (1-1)

Mixtos de estos:

L = 0,1692 / (3,422-1)$^{1/3}$ = 0,162 mm (1-1)

Cinabrio:

L = 0,1692 / (8,1-1)$^{1/3}$ = 0,088 mm (1-1)

Cuarzo:

L = 0,1692 / (2,65-1)$^{1/3}$ = 0,143 mm (1-1)

Sal de Epsom:

L = 0,1692 / (1,7-1)$^{1/3}$ = 0,191 mm (1-1)

Oro:

L = 0,1692 / (19,3-1)$^{1/3}$ = 0,064 mm (1-1)

Como se puede observar, a medida que aumenta la densidad, el tamaño máximo permisible de aplicabilidad de la Ley de Stokes se hace cada vez más pequeño.

EJERCICIO N° 6

Como resultado de la molienda de un mineral de cobre, se obtuvieron partículas con un tamaño promedio de 0,09 mm.

El mineral contenía calcopirita (4,2) y grafito (2,2), y se desea concentrar por gravedad utilizando como fluido el agua en reposo.

PREGUNTAS

1. Se puede o no utilizar la Ley de Stokes, para controlar el comportamiento en esta oprración de concentración?

2. Calcular las velocidades límites de caída para cada especie.

3. Bajo estas condiciones, cuales serán los respectivos isódromos de c/u de las especies?

SOLUCION

1.
El criterio para la aplicación de la Ley de Stokes, lo establece la ecuación (6):
Para calcopirita:
$$L = 0{,}1692/(4{,}2-1)^{1/3} = 0{,}115 \text{ mm}$$
Para el grafito:
$$L = 0{,}1692/(2{,}1-1)^{1/3} = 0{,}159 \text{ mm}$$
Si se puede aplicar la Ley de Stokes, dado que:
$$\mathbf{0{,}09 < 0{,}115 < 0{,}119} \quad (6\text{-}1)$$

2.
Aplicando la Ley de Stokes: $V = 474\ L^2\ (D-1)$, es decir (5):
Para calcopirita:
$$\mathbf{V = 474x(0{,}09)^2x(4.2-1) = 12{,}29\ mm/seg.} \quad (6\text{-}2)$$
Para el grafito:
$$\mathbf{V = 474x(0{,}09)^2x(2{,}2-1) = 4{,}61\ mm/seg.} \quad (6\text{-}2)$$
Las partículas de calcopirita, caen (12,29/4,61) = 2,67 veces más rápido que las de grafito en agua en reposo.

3.
Cuando se aplica la Ley de Stokes, los tamaños isódromos se determinan de la siguiente manera:
Sea:

L = dimensión de la especie más liviana (grafito)
l = dimensión de la especie más densa (calcopirita)
D = densidad de la especie más densa (calcopirita)
d = densidad de la especie más liviana (grafito)

Para tamaños isódromos, se cumple que :
$$\frac{l}{L} = \sqrt{\frac{d-1}{D-1}} \quad (7)$$
El tamaño del grano de calcopirita, isódromo con el de grafito, será:
$$l = 0{,}09.(2{,}2-1) \div (4{,}2-1) = 0{,}055$$
$$\mathbf{l = 0{,}055\ mm} \quad (6\text{-}3)$$
El tamaño del grano de grafito, isódromo con el de calcopirita, será:
$$L = 0{,}09.(4{,}2-1) \div (2{,}2-1) = 0{,}147$$
$$\mathbf{L = 0{,}147\ mm} \quad (6\text{-}3)$$

EJERCICIO Nº 7

Se tiene una muestra formada por galena (7,5) y cuarzo (2,65); en tamaños que oscilan entre 5 y 35 mm de diámetro. La mezcla posee mixtos de estos minerales en condiciones iguales de tamaños.

Los ¾ del peso de los mixtos, son galena.

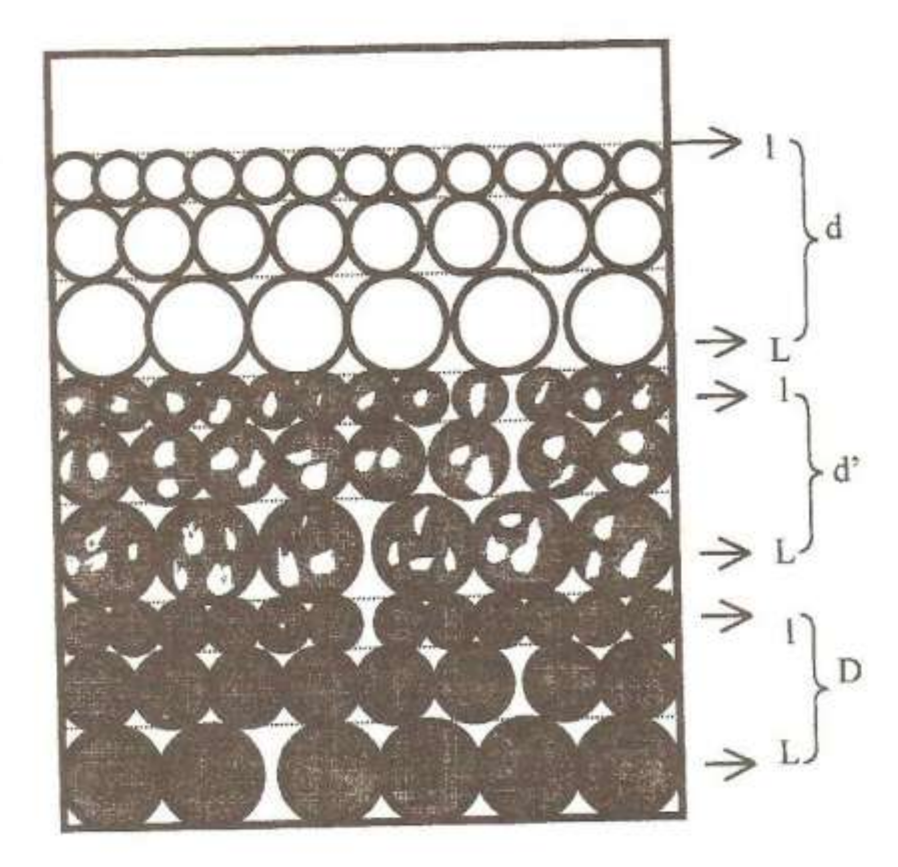
Se quiere realizar una concentración por gravedad (fluido = agua en reposo), de tal manera que se separes por completo los mixtos de las especies puras (ver Fig.1), para volverlos a reducir de tamaño; hasta lograr una completa liberación.

PREGUNTAS

1. Realizar los cálculos necesarios, tendientes a lograr una separación completa de las especies diferentes de la muestra, por medio de una concentración por gravedad.

SOLUCION

1.





Mineral denso (galena)



Mixtos



Mineral liviano (cuarzo)

Figura N° 1:

l = tamaño menor, L = tamaño mayor
d = densidad del liviano (cuarzo)
d' = densiad del mixto
D = densidad del denso (galena)

Lo que se quiere decir con esta gráfica es que el grano más liviano de galena (en agua), debe caer a mayor velocidad que el más pesado de los mixtos; y que el más liviano de estos, quede por debajo del más pesado de cuarzo, por ser este el mineral menos denso de la muestra.

Esto se logra, si al aplicar la Ley de Rittinger para la velocidad de caída máxima en agua, se llega a cumplir que:

$$V_1 = K\sqrt{l(D-1))} \triangleright V_2 = K\sqrt{L^1(d^1-1)} \qquad (8\text{-}1)$$

$$V_3 = K\sqrt{l^1(d^1-1)} \triangleright V_4 = K\sqrt{L(d-1)} \qquad (8\text{-}2)$$

V_1 = velocidad de caída del mineral más denso, de menor tamaño
V_2 = velocidad de caída del mixto, de mayor tamaño
V_3 = velocidad de caída del mixto, de menor tamaño
V_4 = velocidad de caída del mineral más liviano, de mayor tataño.

1.a: Determinación de la densidad del mixto:

Haremos uso de la ecuación (4):

Sea 1,0 gramo de mixto:

Peso de galena en mixto = ¾ = 0,75 g
Peso de cuarzo en mixto = ¼ = o,15 g
Volumen de galena en mixto = 0,75/7,5 = 0,1000 cm^3
Volumen de cuarzo en mixto = 0,25/2,65 = 0,0943 cm^3
Volumen de 1 g de mixto = 0,1943 cm^3

Densidad del mixto = 1/0,1943 = 5,15 g/cm^3 (1.a)

1.b: Determinación del # de cribas o tamices:

Las desigualdades (8-1) y (8-2) se cumplen si $V_1 > V_4$

Por tanto, volvemos a llegar a la expresión (3^1), según la cual

$$l/L > (d-1)/(D-1) = r \qquad (3^1)$$

r = relación de densidades en el agua, entre el cuarzo y la galena, lo cual nos proporciona la razón de una progresión geométrica decreciente; para determinar el número de tamices necesarios para realizar una clasificación previa a la concentración:

Si: n = # de tamices
A_1 = luz de la criba superior (=35 mm)
A_2 = luz de la criba inferior (= 5 mm)

Estas se correlacionan para los efectos perseguidos, mediante la expresión:

$$A_1 = A_2x(r)^{n-1} \qquad (9), \text{ y}$$

$$n = \frac{Ln\left(\dfrac{A_1}{A_2}\right)}{Ln\, r} + 1 \qquad (10)$$

De este modo,

$$n = \frac{Ln\dfrac{5}{35}}{Ln\dfrac{2,65-1}{7,5-1}} + 1 = 2,42 \approx 3 \text{ tamices} \quad (1.b)$$

1.c: Determinación del diámetro de los orificios de las cribas o tamices:

Si L = diámetro de los orificios, se debe cumplir, que

$$L > L_1 > L_2 \ldots. > L_{n-1} > L_n \qquad (11)$$

Ordenamos de modo que:

$$L_1/L = L_2/L_1 = \ldots..L_n/L_{n-1} = r \qquad (12)$$

r = (2,65-1)/(7.5-1) = 0.254

De modo que si:

L = 35 mm
L_1 = 35x0,254 = 8,885 mm
L_2 = 8,885x0,254 = 2,257 mm

El tamiz # 3, se puede construir de 4,99 mm, de modo que todas las partículas pasen por el tamiz de 35 mm, y queden retenidas en el de 4,99 mm (1.c)

Con una clasificación realizada en estos tamices, se cumplirán las desigualdades (8-1) y (8-2), y se pueden separar las especies como lo muestra la Fi.g.1. Sin embargo, es difícil en una sola operación retirar todas las especies y lo que se garantiza es el retiro de la especie de mayor valor (galena). Si volvemos a separar por gravedad ahora el cuarzo y los mixtos; lo harán porque no son isódromos, y para mayor precisión se pueden volver a reclasificar, así:

Utilizando (10):

n^1 = Ln(5/35) ÷ Ln ((2,65-1)/5,15-1)) = 3,11 ≅ 4 tamices.

Los orificios de los tamices, variarían con una r = 0,3976, de modo que:

L = 35 mm, L_1 = 35x0,3976 = 13,916 mm, L_2 = 35x$(0,3976)^2$ = 5,533 mm, L_3 = 35x$(0,3976)^3$ = 2,200 mm. El 4° tamiz se puede fabricar con orificios de 4,999 mm.

EJERCICIO N° 8

Se tienen dos muestras de minerales, una formada por grafito (2,2) y galena (7 5), mientras que la otra está constituida por grafito y calcopirita (4,2).

Estas muestras, por separado se han de someter a una concentración por gravedad, utilizando como fluido el agua en reposo; para lo cual ha de realizarse una concentración previa a la concentración.

Si el tamaño inferior de los granos es de 1,5 mm, y el mayor es de 40 mm:

PREGUNTAS

1. Cuantos tamices o cribas son necesarios en cada caso, y que diámetros deben tener estos para que se produzca la separación completa por gravedad?

SOLUCION

1.

Caso galena-grafito:

Sea:

l = tamaño mínimo (1,5 mm)
L = tamaño máximo (40 mm)
D = densidad de la galena (7,5)
d = densidad del grafito (2,2)

La separación se logra si se cumple la desigualdad (8), y se llega a la (3^1).

$(l/L) > (d-1)/(D-1)$

Si:

M = orificio del tamiz superior (mm)
m = orificio del tamiz inferior (mm), debe cumplirse

$(m/M) > (d-1)/(D-1)$

Pero: $L < M$ y $l > m$, por tanto:

$(l/L) > m/M > (d-1)/(D-1)$

Basta con que : $(m/M) = (d-1)/(D-1)$

De esta manera, seguirácumpliéndose (11), y los tamices se pueden arreglar de modo que

$L_1/L = L_2/L_1 = L_3/L_2 \dots = L_n/L_{n-1} = (d-1)/(D-1)$ (12^1)

$(d-1)/(D-1)$ = razón de una progresión geométrica decreciente
$(D-1)/(d-1)$ = razón de una progresión geométrica creciente.

Así:

$(2,2-1)/(7,5-1) = 0,1846$ (r = decreciente), por tanto:
$L = 40$ mm
$L_1 = 40x0,1846 = 7,384$ mm
$L_2 = 7,384x0,1846 = 1,363$ mm

de tamices = 3 (1-1)

Diámetro de los orificios:

L = **40 mm**
L_1 = **7,384 mm**
L_2 = **1,363 mm** (1-1)

Con esta relación de tamices o cribas, se cumple que

$L_1/L = L_2/L_1 = 0,1846$

Caso calcopirita-grafito:

Razón $r = (2,2-1)/(4,2-1) = 0,375$

$L = 40$
$L_1 = 40x0,375 = 15$ mm
$L_2 = 15x0\ 375 = 5,625$ mm
$L_3 = 5,625x0,375 = 2,109$ mm
$L_4 = 2,109x0,375 = 0,791$ mm

de cribas o tamices = 5 (1-1)

Orificios de las cribas o tamices:

$L = 40$ mm
$L_1 = 15$ mm
$L_2 = 5{,}625$ mm
$L_3 = 2{,}109$ mm
$L_4 = 0{,}791$ mm (1-1)

Se puede fabricar $L = 40{,}05$ mm y $L_4 = 1{,}45$ mm.

En los resultados de este ejercicio se puede observar que el # de tamices en la muestra galena-grafito, fue mayor que en el caso calcopirita-grafito. La explicación a esto se basa en el hecho de que cuanto mayor es la diferencia de densidades entre las especies, con más facilidad se pueden separar por gravedad.

EJERCICIO Nº 9

Con los datos del ejercicio anterior, pero utilizando una progresión creciente, a partir del tamaño menor.

PREGUNTAS

1. Determinar el número de tamices o cribas necesarios para la clasificación previa, utilizando una progresión creciente para cada muestra.
2. Que diámetros deberán tener los orificios de los tamices o cribas para que se produzca una separación completa por gravedad?

SOLUCION

1.

Caso galena-grafito:

Para determinar el # de tamices, se utiliza la ecuación (10) pero transformada así:

$$n = \frac{Ln\frac{A_2}{A_1}}{Ln\,r} + 1 \qquad (10^1)$$

$$n = \frac{Ln\frac{40}{1{,}5}}{Ln\frac{7{,}5-1}{2{,}2-1}} + 1 = 2{,}94 \cong 3$$

n = 3 tamices (9-1)

Cuando "n" da un entero con fracción decimal, siempre se toma en entero inmediatamente superior. Esto es debido a que el tamaño superior "A_2" no es divisible exactamente por "r", hasta llegar a "A_1".

Caso calcopirita-grafito:

$$n = \frac{Ln\frac{40}{1{,}5}}{Ln\frac{4{,}2-1}{2{,}2-1}} + 1 = 4{,}35$$

n = 5 tamices (9-1)

2.

Caso galena-grafito:

Para este caso de progresión creciente, la ecuación (12) se ordenaría así:

$$L_{n-1}/L_n = \cdots = L_2/L_3 = L_1/L_2 = L/L_1 = (D-1)/(d-1) = r \qquad (12^{11})$$

$r = (7{,}5\text{-}1)/(2{,}2\text{-}1) = 5{,}4167$, por tanto:

$L_2 = 1{,}5$ mm (9-2)
$L_1 = 1{,}5 x 5{,}4167 = 8{,}125$ mm (9-2)
$L = 8{,}125 x 5{,}4167 = 44{,}011$ mm (9-2)

En este caso, todos los granos atraviesan el tamiz de malla 44, pero sería necesa-

rio que el tamiz inferior se fabricara con una luz menor que 1,5 mm, por ejemplo 1,49 mm a objeto de que pudiera retener los granos menores.
Caso calcopirita-grafito:

$r = (4,2-1)/(2,2-1) = 2,667$

$L_4 = 1,5$ mm (9-2)
$L_3 = 1,5x2,667 = 4.0$ mm (9-2)
$L_2 = 4x2,667 = 10,667$ mm (9-2)
$L_1 = 10,667x2,667 = 28,4515$ mm (9-2)
$L = 28,4515x2,667 = 75,88$ mm (9-2)

El tamiz "L" se puede fabricar con una luz un poco mayor de 40 mm.

EJERCICIO Nº 10

Rittinger determinó experimentalmente (1) que un grano esférico de galena (7,58) de 16 mm de diámetro recorre en 1 segundo 1,650 mm en agua en reposo, antes de alcanzar la velocidad límite.

PREGUNTAS

1. De que tamaño debería ser un grano de pirita (4,51), para realizar el mismo recorrido en el mismo tiempo?
2. Lo mismo para un grano de cuarzo (2,65)
3. Como consecuencia de lo anterior, resultarían isódromos los granos determinados para pirita y cuarzo?

SOLUCION

1.

Para que un grano de pirita realice este mismo recorrido en el mismo tiempo, debe ser isódromo con el de galena. Los tamaños se pueden determinar así:

Sea:

l = diámetro del grano de galena = 16 mm
L = diámetro del grano de pirita?
D = densidad de la galena = 7,58
d = densidad de la pirita = 4,51

El tamaño del grano de pirita, isódromo al de galena, se calcula mediante la ecuación (3):

$L = lx(D-1)/(d-1) = 16x(7,58-1)/(4,51-1) = 29,994$

$L = 29,994$ mm (10-1)

2.

Para el caso del cuarzo, procedemos de la manera anterior,y el resultado será:

$L = 16x(7,58-1)/(2,65-1) = 63,81$

$L = 63,81$ mm de diámetro para el grano de cuarzo (10-2)

3.

Para determinar si resultan isódromos los granos de pirita y cuarzo encontrados, debemos calcular sus respectivas velocidades de caída, y si estas resultan iguales, entonces serán isódromos.

Para la pirita:

$V_p = 5,11x((29,994(4,51-1))^{1/2} = 52,431$ mm/seg.(10-3)

Para el cuarzo:

$V_C = 5,11x((63,81(2,65-1))^{1/2} = 52,433$ mm/seg. (10-3)

Si son isódromos el cuarzo y la pirita (10-3)

EJERCICIO Nº 11

PREGUNTAS

1. Calcular el tamaño del grano de calcopirita (4,2) que es isódromo en el agua, con un geano esférico de cuarzo (2,65) de 2,5 mm de diámetro.
2. ¿Es posible separar por gravedad una muestra que contenga estos minerales, con los tamaños de grano calculados para la isodromía; y suponiendo que no encuentran obstáculos en su caída?. El agua está en reposo.

SOLUCION

1.

Sea:

l = diámetro del grano de calcopirita
L = diámetro del grano de cuarzo= 2,5 mm
d = densidad del cuarzo = 2,65
D = densidad de la calcopirita = 4,2

El grano isódromo de calcopirita, se puede determinar con la ayuda de (3):

l = Lx(d-1)/(D-1)
l = 2,5x(2,65-1)/(4,2-1) = 1,289
l = 1,289 mm (11-1)

2.

Para contestar esta pregunta, es preciso determinar el recorrido inicial que cada partícula (independientemente de su tamaño), efectúa al caer en el líquido (agua); antes de alcanzar su velocidad límite. Esto lo haremos mediante la expresión :

$$h = \frac{g}{2} \cdot \frac{D-1}{D} t^2 \qquad (13)$$

Donde:

h = recorrido inicial de la partícula al caer (mm)
g = aceleración de la gravedad (= 9800 mm/seg.^{2})
D = Densidad del mineral (g/cm^3)
t = tiempo (supongamos = 0,05 seg.)

Para la calcopirita:

$$h = \frac{9800}{2} \cdot \frac{4,2-1}{4,2} \cdot (0,05)^2 = 9,334 \text{ mm}$$

Para el cuarzo:

$$h = \frac{9800}{2} \cdot \frac{2,65-1}{2,65} \cdot (0,05)^2 = 7,627 \text{ mm}$$

Como se puede observar, (13) no contiene el diámetro de la partícula, por tanto, la caída de los granos en el período inicial no depende de este pero sí de su densidad y el recorrido inicial de la partícula más densa (calcopirita), antes de llegar a la velocidad límite; es mayor que el de la partícula más liviana (cuarzo) en el mismo tiempo.

Lo anterior permite concluir que aunque los granos sean isódromos, las partículas más densas caerán primero al fondo del recipiente, debido a que al alcanzar la velocidad límite, llevan recorrido un espacio mayor (11-2).

EJERCICIO Nº 12

PREGUNTAS

1. Partiendo del reposo y utilizando como fluido el agua, ¿ en que tiempo habrán recorrido los granos de calcopirita (4,2), el mismo espacio que los granos de galena (7,58) en 0,5 seg.?

SOLUCION

1.

Despejando de la ecuación (13):

$$t = \left(\frac{2hD}{g(D-1)} \right)^{1/2}$$

Para la galena:

$$h = (9800/2) \cdot (7,58-1)/7,58 \cdot (0,5)^2 = 1063,39 \text{ mm}$$

Para la calcopirita:

$$t = \left[\frac{2x1063{,}39x4{,}2}{9800(4{,}2-1)} \right]^{1/2} = 0{,}534 \text{ seg.} \quad (12\text{-}1)$$

Esto quiere decir, que para realizar el mismo recorrido inicial en agua, la partícula más liv ana (calcopirita), utiliza un tiempo mayor (12-1).

EJERCICIO Nº 13

PREGUNTAS

1. ¿Cuál será la velocidad límite de un grano de galena (7,58), esférico de 16 mm de diámetro, que parte del reposo utilizando como fluido el agua; justo después de haber realizado el recorrido inicial?

2. ¿Cuáles serán la altura y el tiempo de la caída inicial?

3. Realizar los cálculos (1.) y (2.) para el cuarzo (2,65).

4. ¿Cuánto tiempo tardaría la partícula de cuarzo en realizar el mismo recorrido que la galena?

5. ¿Qué altura habrá descendido la partícula de cuarzo en el mismo tiempo que la partícula de galena?

SOLUCION

1.

En este caso, utilizamos la siguiente expresión:

$$G = \frac{D-1}{D} \cdot g - \frac{3}{4} \cdot \frac{Kv^2}{DL} \quad (14)$$

Donde:

G = aceleración de la caída de los granos en agua

D = densidad de la partícula = 7,58 g/cm^3 = 0,00758 g/mm^3

g = aceleración de la gravedad = 9800 mm/seg.^{2}

K = constante, que para el agua = 0,5

V = velocidad en mm/seg.

L = diámetro de la partícula esférica = 16 mm

Cuando se alcanza la velocidad límite, G = 0 ∴

$$\frac{D-1}{D} \cdot g - \frac{3}{4} \cdot \frac{Kv^2}{DL} = 0 \quad \therefore$$

$$v = \left[\frac{4}{3} \cdot \frac{D-1}{D} g \cdot \frac{DL}{K} \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$v = \left(\frac{4}{3} x \frac{7{,}58-1}{7{,}58} x9800 \frac{0{,}00758x16}{0{,}5} \right)^{1/2} = 52{,}45 \text{ mm/seg} \quad (13\text{-}1)$$

Este mismo valor se puede obtener, utilizando la ecuación de Rittinger:

V = 5,11x((16x(7,58-1))$^{1/2}$ = 52,43 mm/seg. (13-1)

2.

Utilizando (13):

Sabemos que:

$$v = \frac{h}{t} = \frac{g}{2} \cdot \frac{D-1}{D} t \;\therefore\; t = \frac{2vD}{g(D-1))}$$

t = (2x52,45x7,58)÷(9800x6,58) = 0,0123 seg. (13-2)

h = (9800/2)x(6,58/7,58)x(0,0123)^2 (13-2)

3.
Los cálculos para el cuarzo son:
Utilizando (15):

$$v = \left[\frac{4}{3} \cdot \frac{2,65-1}{2,65} x9800x \frac{0,00265x16}{0,5}\right]^{1/2} = 26,27 \text{ mm/seg.} \; (13\text{-}3)$$

Con Rittinger:

V = 5,11x[(16x(2,65-1)]$^{1/2}$ = 26,26 mm/seg. (13-3)

Utilizando (13):

t = (2x26,27x2,65) ÷ (9800x1,65) = 8,61x10^{-3}seg. (13-3)
h = (9800/2)x(1,65/2,65)x(8,61x10^{-3})^2 = 0,226 mm (13-3).

La diferencia en los resultados, para la galena y para el cuarzo, se debe exclusivamente a la densidad.

4.
Para este cálculo, despejamos "t" desde (13):
t =[(2x0,647x2,65)/(9800x1,65)]$^{1/2}$ = 0,0146 seg. (13-4)

5.
Utilizamos (13):

h = (9800/2) · (1,65/2,65) · (0,0123)^2 = 0,462 mm (13-5)

EJERCICIO Nº 14

PREGUNTAS

Realizar los mismos cálculos del ejercicio anterior (#13), pero para un tamaño de grano de 4 mm.

SOLUCION

1.
Para la galena:
Utilizando (15):
V = ((4x6,58x9800x0,00758x4) ÷ (3x7,58x0,5))$^{1/2}$ = 26.27 mm/seg.
V = 26,27 mm/seg. (14-1)

Utilizando Rittinger:
V = 5,11 · ((4x(7,58))$^{1/2}$ = 26,22 mm/seg.
V = 26,22 mm/seg. (14-1)

2.
t = (2x26,27xt,58) ÷ (9800x6.58) = 6,18 · 10^{-3} seg.
t = 6,18 · 10^{-3} seg. (14-2)

Utilizando (13):
h = (9800/2) · (6,58/7,58) · (6,18 . 10^{-3})^2 = 0,162 mm
h = 0,162 mm (14-2)

3.
Para el cuarzo:
V = ((4x1,65x9800x0,00265x4) ÷ (3x2,65x0,5))$^{1/2}$ = 13,13 mm/seg.
V = 5,11 · (4x1,65)$^{1/2}$ = 13,13 mm/seg.
V = 13,13 mm/seg. (14-3)
t = (2x13,3x2,65) ÷ (9800x1,65) = 4,3x10^{-3} seg.
t = 4,3 · 10^{-3}seg. (14-3)
h = (9800/2) · (1,65/2,65) · (4,3x10^{-3})^2 = 0,00565 mm
h = 0,00565 mm (14-3)

4.
t = {(2x0,162x2,65) ÷ (9800x1,65)}$^{1/2}$= 7,3 · 10^{-3} seg.
t = 7,3 · 10^{-3}seg. (14-4)

5.
h = (9800/2) · (1,65/2,65) · (6,18x10^{-3})^2 = 0,1165 mm
h = 0,1165 mm (14-5)

EJERCICIO Nº 15

PREGUNTAS

1. Calcular la velocidad de caída límite (libre), en agua en reposo para un grano esférico de galena de 1,0 mm de diámetro.

2. Igual que en (1.), para un grano de 2,5 mm de diámetro.

3. ¿Qué ocurrirá con los granos de (1.) y (2.), si son sometidos a la acción de una corriente ascensional de 13,108 mm/seg.?.

4. ¿Qué ocurrirá con las partículas de (1.) y (2.), si la velocidad de la corriente ascensional fuera de 20,725 mm/seg.?

5. ¿Qué ocurrirá con estas partículas, si la velocidad de la corriente ascensional fuera de 5,0 mm/seg.?

SOLUCION

1.

Sea:

V_1 = velocidad de caída libre de la galena

l = diámetro del grano de galena = 1,0 mm

D = densidad de la galena = 7,58 g/cm^3

Utilizando (2):

$$V_1 = 5{,}11 \cdot (1x6{,}58)^{1/2} = 13{,}108 \text{ mm/seg}$$

$$\mathbf{V_1 = 13{,}108\ mm/seg.}\ (15\text{-}1)$$

2.

Volviendo a aplicar (2) para este caso:

$$V_2 = 5{,}11 \cdot (2{,}5x6{,}58)^{1/2} = 20{,}725 \text{ mm/seg.}$$

$$\mathbf{V_2 = 20{,}725\ mm/seg.}\ (15\text{-}2)$$

3.

Sea:

V_l = velocidad de la corriente líquida del agua

V_r = velocidad relativa entre la corriente de agua y la de la partícula.

$$V_r = V_l - V_i \qquad (16)$$

Para el grano de (1.):

$$V_{r1} = 13{,}108 - 13{,}108 = 0$$

$$\mathbf{V_{r1} = 0}\uparrow\downarrow\ (15\text{-}3)$$

La partícula de galena de 1,0 mm de diámetro, por tener $V_r = 0$, permanecerá suspendida en el fluido.

Para el grano de (2.):

$$V_{r2} = 13{,}108 - 20{,}725 = -7{,}617 \text{ mm/seg.}$$

$$\mathbf{V_{r2} = 7{,}617\ mm/seg.}\downarrow\ (15\text{-}3)$$

El hecho de que V_r sea negativa, indica que esta partícula desciende con una velocidad de 7,617 mm/seg.

4.

Para el caso (1.):

$$V_{r1} = 20{,}725 - 13{,}108 = 7{,}617 \text{ mm/seg.}$$

$$\mathbf{V_{r1} = 7{,}617\ mm/seg.}\uparrow\ (15\text{-}4)$$

Para el caso (2.):

$$V_{r2} = 29{,}725 - 20{,}725 = 0$$

$$\mathbf{V_{r2} = 0}\uparrow\downarrow\ (15\text{-}4)$$

En el caso (1.): $V_{r1} > V_1$, y por tanto, la corriente arrastra la partícula con una velocidad de 7,617 mm/seg. Y no la deja descender (la expulsa del recipiente).

En el caso (2.): $V_{r2} = V_2$. La partícula no desciende (permanece suspendida en el fluido).

5.

Caso (1.):

$$V_{r1} = 5 - 13{,}108 = -8{,}108 \text{ mm/seg}$$

$$\mathbf{V_{r1} = 8{,}108\ mm/seg.}\downarrow\ (15\text{-}5)$$

Caso (2.):

$$V_{r2} = 5 - 20{,}725 = -15{,}725 \text{ mm/seg.}$$

$$\mathbf{V_{r2} = 15{,}725 \text{ mm/seg.}}\downarrow \ (15\text{-}5)$$

Ambas partículas descienden pero a diferentes velocidades. En este caso, se efectuaría una clasificación por tamaños, y las partículas de (2.), por descender a mayor velocidad se asentarían en el fondo del recipiente, es decir, por debajo de las de (1.).

EJERCICIO Nº 16 (2)

En una instalación de preconcentración de un mineral de cinc y plomo, se utiliza la separación por medios densos. Se opera con una suspensión de Fe-Si en la que se tiene una densidad de 2,73 g/cm^3, y se obtienen unos productos flotados y hundidos de densidades próximas a 2,66 y 2,81 g/cm^3 respectivamente.

El diagrama de bloque de la operación es el siguiente:

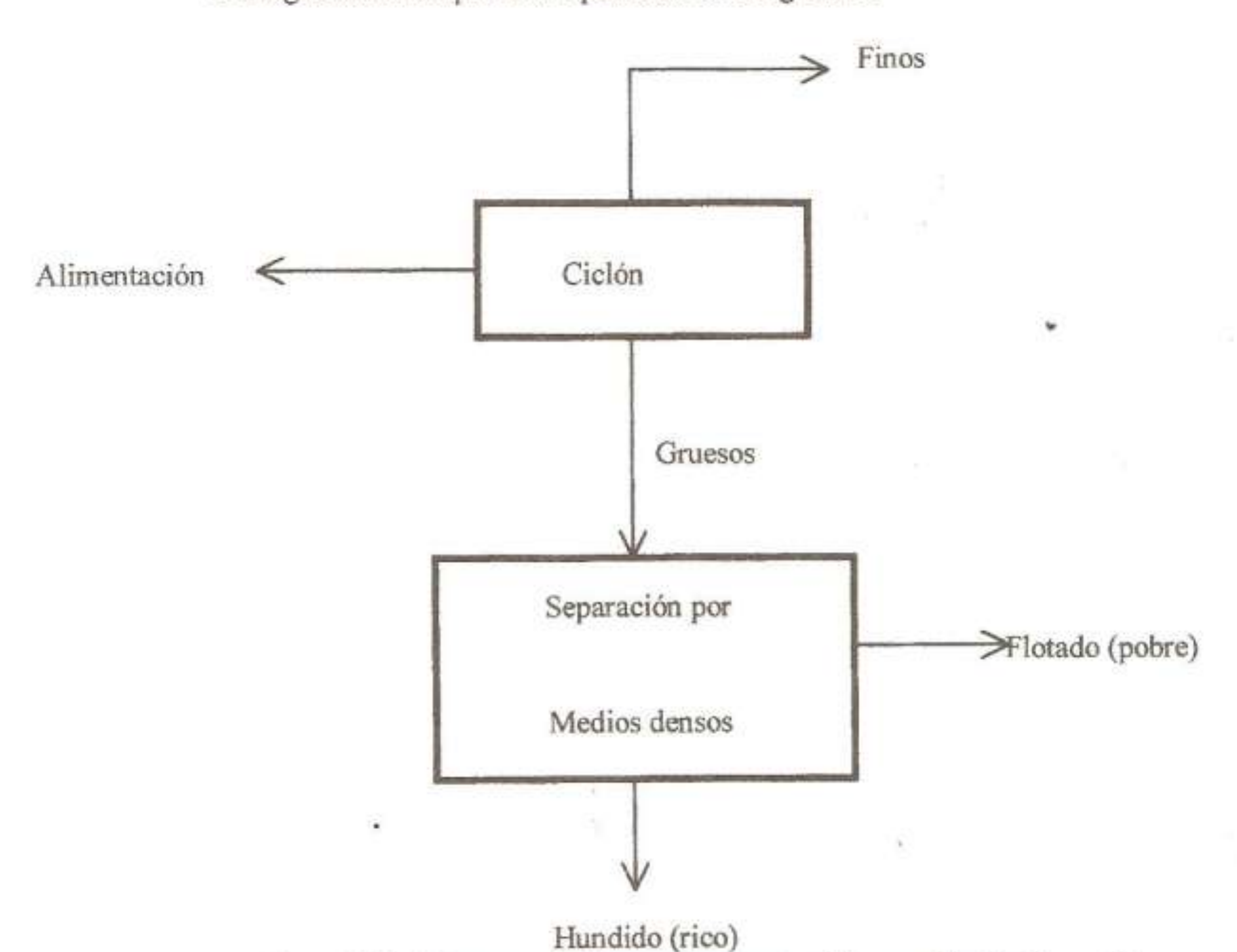


Figura Nº 2: Diagrama de bloques (concentración por Medios Densos)

La alimentación se pasa por un ciclón para eliminar finos, y los gruesos se llevan a la separación por medios densos.

Los finos representa un 1% de la alimentación.

La composición media de la alimentación y de los productos, obtenidos en un período de funcionamiento de la instalación de un mes es la siguiente:

	Zn(%)	Pb(%)
Alimentación........	4,99	0,745
Finos en ciclón....	7,00	1,00
Flotado................	0,88	0,10
Hundido..............	8,80	1,27

PREGUNTAS

1. Determinar la composición de la alimentación en la instalación de medios densos.

2. Determinar las cantidades de los productos ligeros y densos obtenidos, realizando el balance referido al cinc y al plomo.

SOLUCION

1.

Para el ciclón (ver Fig.2):

Sea:

A = peso de la alimentación

F = peso de los finos

G = peso de los gruesos

El balance resulta ser:

$$A = F + G \qquad (17)$$

Supongamos que: A=100 g, F=1,0 g y G = 99,0 g.

Balance para el Zn (ver el cuadro anterior):

$$0{,}0499A = 0{,}07F + X_{Zn}G$$

X_{Zn} G = fracción de Zn en los gruesos

Dando valores:

$$0{,}0499x100 = 1x0{,}007 + X_{Zn}x99 \therefore$$

$$X_{Zn}\text{, en gruesos} = (100x0{,}0499 - 1x0\ 007)/99 = 0{,}0497$$

Zn = 4,97% en la alimentación del sistema de medios densos (16-1)

Balance para el plomo:

$$0{,}00745A = 0{,}01F + X_{Pb}G$$

$X_{Pb}G$ = fracción de Pb en los gruesos

Dando valores:

$$0{,}00745x100 = 0{,}01x1 + X_{Pb}x99 \therefore$$

$$X_{Pb} = (100x0{,}00745\text{-}1x0{,}01)/99 = 0{,}00742$$

Pb = 0,742% en la alimentación del sistema de medios densos (16-1)

2.

Las cantidades de productos ligeros (P), y densos (R) para una alimentación a la instalación de medios densos (100), se calcula mediante los balances siguientes:

$$100 = P + R \qquad (18)$$

Balance para el Zn:

$$100x0{,}0497 = 0{,}0088P + 0{,}088R$$

De (18): $P = 100 - R \therefore$

$$4{,}97 = 0{,}0088 \cdot (100\text{-}R) + 0{,}088R \therefore$$

R = (4,97-0,88)/0,0792 = 51,6 (16-2)

P = 100-51,6 = 48,4 (16-2)

Balance para el Pb:

$$100x0{,}00742 = 0{,}001P + 0{,}00{,}0127R$$

$P = 100 - R \therefore$

R = (0,742-0,01)/0,0117 = 54,9 (16-2)

P = 100-54,9 = 45,1 (16-2)

EJERCICIO N° 17 (3)

Una celda experimental de flotación (ver Fig.3) tiene un volumen efectivo de 12 litros.

Dicha celda es alimentada con un mineral de plomo que contiene 65%Pb, y una densidad de pulpa con el 15% de sólidos por peso.

Se obtiene un concentrado con 72,5%Pb y una cola con 0,5%Pb.

La gravedad específica del sólido es 3,474.

PREGUNTAS

1. Determinar la relación agua-sólidos en peso.
2. La gravedad específica de la pulpa.
3. El porcentaje de sólidos por volumen
4. El volumen del sólido.
5. El volumen de agua.
6. El peso del sólodo en la alimentación.
7. La razón de concentración.
8. El peso del concentrado

9. El peso de las colas.
10. La recuperación.

SOLUCION

1.

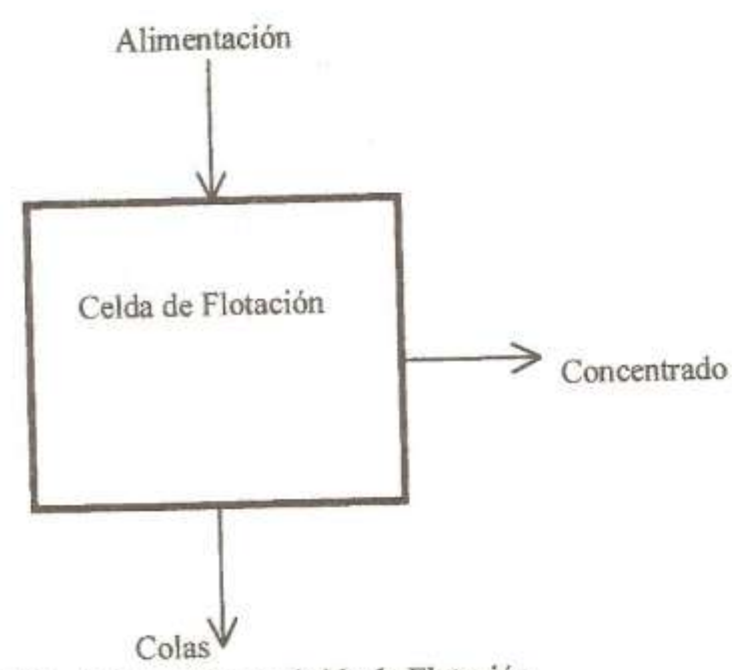


Figura N° 3: Balance de una Celda de Flotación.

En la solución de estos ejercicios, vamos a utilizar los símbolos que se utilizan en la bibliografía que trata el tema de la flotación, independientemente de que se puedan haber utilizado para otras consideraciones.

Sea:

A = % sólidos por peso (=15)

B = relación agua/ sólidos por peso.

$$B = \frac{100 - A}{A} \qquad (19)$$

B = (100-15)/15 = 5,67

B = 5,67:1 (17-1)

2.

Sea:

G = gravedad específica del sólido (=3,474)

S = gravedad específica de la pulpa

$$S = \frac{1 + B}{B + \frac{1}{G}} \qquad (20)$$

$$S = \frac{1 + 5{,}67}{5{,}67 + 1/3{,}474} = 1{,}119 \quad (17\text{-}2)$$

S = 1,1195 (17-2)

3.

Sea:

V = % sólidos por volumen

$$V = A\left(\frac{S}{G}\right) \qquad (21)$$

V = 15·(1,1195/3,474) = 4,834

V = 4,834 (17-3)

4.

Volumen del sólido = 12x0,04824 = 0,58056 lts = 580,56 cm^3

Volumen del sólido = 0,58056 lts = 580,56 cm^3(17-4)

5.

Volumen de agua = 12 – 0,58056 = 11,419 lts

Volumen de agua = 11,419 lts (17-5)

6.

Aplicando la ecuación (4):

Peso del sólido = 580,56x3,474 = 2016,86 g.

Peso del sólido alimentado = 2016,86 g.(17-6)

7.

Sea:

K = razón de concentración

c = % del elementode interés en el concentrado

f = % del elemento de interés en la alimentación

t = % del elemento de interés en las colas

$$K = \frac{c-t}{f-t} \qquad (22)$$

K = (72,5-0,5)/(6,5-0,5) = 12

K = 12 (17-7)

8.

Sea:

F = peso de la alimentación

C = peso del concentrado

$$K = \frac{F}{C} \qquad (23)$$

C = 2016,86/12 = 168,07 g.

C = 168,07 g. (17-8)

9.

Sea:

T = peso de las colas

$$F = C + T \qquad (24)$$

T = F – C = 2016,86-168,07 = 1848,79 g

T = 1848,79 g (17-9)

10.

Sea:

R = recuperación (%)

$$R = \frac{c(f-t)}{f(c-t)} x100 \qquad (25)$$

R = 72,5·(6,5-0,5) ÷ 6,5·(72,5-0,5) = 92,95%

R = 92,95% (17-10)

EJERCICIO Nº 18

En pruebas preliminares en un laboratorio de flotación que utilizó para laboratorio, maquinar Denver # D-2 o D-12 (4), se determinaron los siguientes resultados para un mineral de cobre, con miras a optimizar la recuperación:

Gravedad específica del mineral seco = 2,7

% sólidos en la alimentación (laboratorio) = 30

Tiempo de retención en laboratorio = 6,5 min.

Asumir que en planta se procesarán 14500 toneladas cortas de mineral seco por día.

Para la producción en la planta, se especifican celdas de 500 ó 600 pies cúbicos (ft^3), (utilizar las de 500 ft^3).

Utilizar durante la flotación 15% en volumen de aire.

PREGUNTAS

1. Determinar el factor de escala, para el tiempo de retención entre el laboratorio y la planta.
2. Determinar el tiempo de retención en planta.
3. ¿Cuál será el flujo de pulpa a la sección de flotación?
4. ¿Cuál será el flujo de pulpa aireada?
5. Calcular el requerimiento de pulpa por celda.
6. Calcular el número total de celdas.
7. Calcular el número de baterías ó pilas de celdas.

SOLUCION

1.

Utilizando datos experimentales tabulados (4), se puede calcular el factor de escala para el tiempo de retención, entre la flotación en laboratorio y la flotación en planta, así:

Para el cobre:

Tiempo de retención usual en flotación:

En la industria = 13 a 16 min.

En laboratorio = 6 a 8 min.

Tiempo promedio de flotación:

En la industria = (13+16)/2 = 14,5 min.

En laboratorio = (6+8)/2 = 7 min.

Factor de escala = 14,5/7 = 2,07

Factor de escala = 2,07 (18-1)

2.

Tiempo de retención en la planta = 6,5x2,07 = 13,455 min.

Tiempo retención en planta = 13,46 min. (18-2)

3.

Para calcular el flujo de pulpa en la sección de flotación utilizamos datos experimentales (5).

Para:

Gravedad específica del sólido = 2,7

% sólidos por peso = 30

Encontramos el siguiente flujo de pulpa (5):

(ft^3de pulpa/min/ton.de sólidos secos/hr) = 1,45

Así:

(14500 ton.sólidos/día) ·(día/24hr) · (1,45 ft^3 pulpa/min.) · (hr/ton. Sólidos) = 876,04

Flujo de pulpa en sección de flotación = 876 ft^3/min. (18-3)

4.

Dado que el aire utilizado es 15% del volumende la pulpa:

Flujo de pulpa aireada = 876/0,85 = 1030,64

Flujo de pulpa aireada = 1031 ft^3/min. (18-4)

5.

Pulpa total requerida = 1030,64x13,46 = 13872,41

Pulpa total requerida = 13872,41 ft^3/ (18-5)

6.

total de celdas = (13872,41 ft^3) ÷ (500 ft^3/celda) = 27,74

total de celdad = 28 (18-6)

7.

Utilizando datos tabulados (5), se consigue el # de celdas de flotación Denver que debe tener cada pila o batería para flotación preliminar o de desbaste de mineral de cobre, siendo este entre 12 y 20 celdas por pila, y como óptimo, entre 14 y 17. Si tomamos 14:

pilas = (28 celdas) ÷ (14 celdas/pila) = 2

de pilas = 2 (18-7)

EJERCICIO Nº 19

En un laboratorio para pruebas de flotación(4) que utilizó las máquinas para laboratorio de flotación Denver # D-2 ó d-12; se lograron los siguientes resultados para optimizar la recuperación y el grado de una muestra particular de carbón:

Gravedad específica de sólidos secos = 1,5

% sólidos de alimentación a la máquina (laboratorio) = 6,0

Tiempo de retención en la flotación = 2,4 min.

Asumir que en la planta se procesarán 100 toneladas cortas de carbón por hora, y que se utilizan aproximadamente 15% del volumen en aire en cualquier momento en una celda y que además se especifican celdas de 500 ft^3 para esta flotación.

PREGUNTAS

1. Determinar el factor de escala para el tiempo de retención entre el laboratorio y la planta, así como el tiempo de retención en planta.
2. Determinar el número de celdas y el número de pilas o baterías para conducir la operación.

SOLUCION

1.

Utilizando datos tabulados (4), se puede calcular el factor de escala entre el laboratorio y la planta, así como el tiempo de retención en planta:

Para el carbón:

Tiempo usual de retención:

En laboratorio = 2 a 3 min.

En planta = 3 a 5 min.

Tiempo promedio de retención:

En laboratorio = (2+3)/2 = 2,5 min.

En planta = (3+5)/2 = 4,0 min.

Factor de escala = 4/2,5 = 1,6

Factor de escala = 1,6 (19-1)

Tiempo de retención en planta = 2,4x1,6 = 3,84

Tiempo de retención en planta = 3,84 min. (19-1)

2.

Utilizando datos experimentales (5):

Para:

Gravedad específica de sólidos = 1,5

% sólidos por peso = 6

Se encuentra en tablas (5):

(ft^3de pulpa/min.) · (tonelada de sólidos/hr) = 8,78

Flujo de pulpa para la sección de flotación = (100 ton.sólidos/hr) · (8,78ft^3pulpa/min) · (hr/ton.sólidos) = 878 ft^3pulpa/min.

Flujo de pulpa aireada = 878/0,85 = 1033 ft^3pulpa/min.

Pulpa total requerida = (1033 ft^3/min)x3,84 min =3967 ft^3

total de celdas = (3967 ft^3)/(500 ft^3/celda) = 7,934

total de celdas = 8 (19-2)

Utilizando tablas (4), se especifica el # de celdas de flotación por pila, para flotación de desbaste del carbón; y está entre 3 y 6 celdas por pila. Si asumimos 4:

de pilas = (8 celdas) ÷ (4 celdas/pila) = 2 pilas

Se especifican 2 pilas de a 4 celdas c/u (19-2)

EJERCICIO Nº 20 (3)

PREGUNTAS

1. A partir de los datos que se relacionan abajo, determinar las cantidades estequiométricas necesarias para preparar 10 gramos de xantato sec-butílico de potasio (Z-8), partir de alcohol sec-butílico; bisulfuro de carbono y KOH. Este xantato fué utilizado como colector en la flotación del mineral de cobre de las minas de Aroa.

Datos del producto:

Sec-butanol (C_4H_9OH):

Densidad = 0,81 g/cm^3
Pureza = 99,5%
Peso molecular = 74,1224

Bisulfuro de carbono (CS_2):

Densidad = 1,26 g/cm^3
Pureza = 99,5%
Peso molecular = 76,131

Hidróxido de potasio (KOH):

Pureza = 86,0%
Peso molecular = 56,1056

SOLUCION

1.

La reacción es la siguiente:

$$C_4H_9OH + CS_2 + KOH \longleftrightarrow C_4H_9\text{-O-CS}\cdot S\cdot K + H_2O$$

Xantato = C_4H_9-O-CS·S·K

Cantidades de reactivos:

Sec-butanol = 10·(74,1224/188,34388)·(1/0,995) · (1/0,81) = 4,883 cm^3

Sec-butanol = 4,883 cm^3 (20-1)

Hidróxido de K = 10·(56,1056/188,3438) · (1/0,86) = 3,464

KOH = 3,464 g.(20-1)

Bisulfuro de C = 10·(76,131/188,3438) · (1/0,995) · (1/1,26) = 3,224

CS_2 = 3,224 cm^3 (20-1)

EJERCICIO Nº 21

En la flotación del mineral de cobre de las minas de Aroa, se utilizó como reactivo colector el xantato etílico de potasio (Z-3) en solución del 10% y a una dosis de 0,05 lbs/ton de mineral.

Experimentalmente se determinó (3) que el peso de una gota de este reactivo fue de 0,0166 g.

PREGUNTAS

1. Calcular el número de gotas a alimentar a la celda para una prueba con mineral sin deslamar (= 1037,42 g).

SOLUCION

1.

Llevamos el consumo g/ton.

Dosis = 0,05(lb/ton) · 0,4536(Kg/lb) · 1000(g/Kg) = 22,68 g/ton.

Consumo de Z-3= 22,68(g/ton) · (1 ton/10^{6}g) · 1037,42 g = 0.002353 g/prueba

Dado que la solución es al 10%:

Z-3 en 1 gota = 0,0166x0,1 = 0,00166 g.

de gotas = 0,02353/0,00166 = 14,14

de gotas por prueba = 14 (21-1)

EJERCICIO Nº 22

Al experimentar la flotación del mineral de cobre de las minas de Aroa (3), en una prueba se cargaron a la celda 1045,67 gramos de mineral previamente deslamado, el cual contenía 1,98%Cu. Los resultados presentaron un concentrado que contenía 16,19%Cu y las colas 0,88%Cu.

PREGUNTAS

1. ¿cuál resultó ser el peso del concentrado?
2. ¿Cuál resultó ser el peso de las colas?
3. ¿Cuál fue la razón de concentración?
4. ¿Cuál fue la recuperación?

SOLUCION

1.

De nuevo recordemos que:

F = peso de la alimentación a la celda = 1045,67 g
C = peso del concentrado = ?
T = peso de las colas = ?
f = % del metal de interés en la alimentación = 1,98%
c = % del metal de interés en el concentrado = 16,69%
t = % del metal de interés en las colas = 0,88%
K = razón de concentración (peso de alimentación necesario para producir una unidad de peso en el concentrado)
R = recuperación

De la ecuación (23), podemos despejar:

$$C = \frac{F}{K} = F\frac{f-t}{c-t} = 1045{,}67\frac{1{,}98-0{,}88}{16{,}19-0{,}88} = 75{,}13$$

C = 75,13 g (22-1)

2.

T = F-C = 1045,54 – 75,13 = 970,54

T = 970,54 g (22-2)

3.

Recordando la ecuación (22):

$$K = \frac{c-t}{f-t} = \frac{16{,}19-0{,}88}{1{,}98-0{,}88} = 13{,}92 \quad (22\text{-}3)$$

Se prueba mediante la (23):

K = F/C = 1045,67/73,13 = 13,92 (22-3)

K = 13,92 toneladas de alimentación por tonelada de concentrado .

4.

La recuperación la calculamos con cualquier forma de la ecuación (25):

$$R = \frac{100c}{Kf} = \frac{100x16{,}19}{13{,}92x1{,}98} = 58{,}74\%$$

$$R = \frac{100c(f-t)}{f(c-t)} = \frac{100x16{,}19(1{,}98-0{,}88)}{1{,}98(16{,}19-0{,}88)} = 58{,}75\%$$

R = 58,75% (22-4)

EJERCICIO Nº 23

El mineral de cobre de las minas de Aroa sin deslamar presentó una gravedad específica de 2,71 (3).

Con este material se elaboró una pulpa que tenía 10% de sólidos por peso, a objeto de someterla a una operación de flotación en una celda Denver Sub-A N°5. Esta celda fue llenada con pulpa hasta 1,5 pulgadas del labio, presentando un volumen efectivo de 9,92 litros.

PREGUNTAS

1. Relación agua a sólidos por peso?
2. Gravedad específica de la pulpa?
3. La constante de sólidos?
4. El peso de un litro de pulpa en gramos?
5. El peso del mineral soco (gramos), en un litro de pulpa?
6. El porcentaje de sólidos por volumen?
7. El volumen del sólido?
8. El volumen de agua?
9. El peso del sólido?

SOLUCION

1.

Recordando la ecuación (19):

B = relación agua sólidos por peso

A = % de sólidos por peso

$$B = \frac{100 - A}{A} = \frac{100 - 10}{10} = 9$$

B = 9.00:1 (23-1)

2.

Recordando la ecuación (20):

S = gravedad específica de la pulpa

G = gravedad especifica del sólido en la pulpa

$$S = \frac{1 + B}{B + \frac{1}{G}} = \frac{1 + 9}{9 + \frac{1}{2,71}} = 1,067$$

S = 1,067 (23-2)

3.

Sea:

K^1 = constante de sólidos

$$K^1 = \frac{G - 1}{G} \quad (26)$$

$K^1 = (2,71-1)/2,71 = 0,631$

$\mathbf{K^1 = 0,631}$ (23-3)

4.

Sea:

W^1 = peso de un litro de pulpa en gramos

$$W^1 = \frac{100000}{100 - AK^1} \quad (27)$$

$W^1 = 100000/(100-10x0,631) = 1067,35$

$\mathbf{W^1 = 1067,35}$ **g.** (23-4)

5.

$$L^1 = \frac{W^1 - 1000}{K^1} \quad (28)$$

L^1 = peso del mineral seco (gramos, en un litro de pulpa

$L^1 = (1067,35-1000)/0,631 = 106,73$

$\mathbf{L^1 = 106,73}$ **g.** (23-5)

6.
Aplicando la ecuación (21):

$V = Ax(S/G) = 10x(1{,}067/2{,}71) = 3{,}94$

V = 3,94% (23-6)

7.

Volumen del sólido = 9,72x0,0394 = 0,383 lts

Volumen del sólido = 0,383 lts. (23-7)

8.

Volumen de agua = 9,72-0,383 = 9,337 lts

Volumen de agua = 9,337 lts (23-8)

9.
Aplicando (4):

Peso del sólido = 0,383x1000x2,71 = 1037,93

Peso del sólido = 1037,42 g. (23-9)

EJERCICIO N° 24

PREGUNTAS

Realizar los mismos cálculos del ejercicio anterior pero con el mineral deslamado, presentando una gravedad específica de 3,474.

SOLUCION

1.
Utilizando la ecuación (19):
La relación agua/sólido por peso (B):
B = (100-10)/10 = 9
B = 9:1 (24-1)

2.
Utilizando (20), calculamos la gravedad específica de la pulpa (S)

$$S = \frac{1+9}{9+\frac{1}{3{,}474}} = 1{,}077$$

S = 1,077 (24-2)

3.
Aplicando (26) calculamos la constante de sólidos (K^1):
$K^1 = (3{,}474-1)/3{,}474 = 0{,}7121$
K^1 = 0,7121 (24-3)

4.
Utilizando (27) calculamos el peso de un litro de pulpa en gramos (W^1):

$$W^1 = \frac{100000}{100-10x0{,}7121} = 1076{,}67$$

W^1 = 1076,67 g (24-4)

5.
Con ayuda de (28) calculamos el peso de mineral seco en un litro de pulpa (L^1):
$L^1 = (1076{,}67-1000)/0{,}7121 = 107{,}67$
L^1 = 107,67 g (24-5)

6.
El % de sólidos por volumen (V), se calcula por medio de (21):
$V = 10 \cdot (1{,}077/3{,}474) = 3{,}10$
V = 3,10% (24-6)

7.
Volumen del sólido = 9,72x0,031 = 0,301 lts
Volumen del sólido = 0,301 lts. (24-7)

8.
Volumen de agua = 9,72-0,301 = 9,419
Volumen de agua = 9,419 lts (24-8)

9
Aplicando (4) podremos calcular el peso del sólido:
Peso del sólido = 0,301x1000x3,474 = 1045,67
Peso del sólido = 1045,67 g (24-9)

EJERCICIO N° 25

Un circuito de flotación para mineral de cobre está formado por una etapa de flotación primaria y una de limpieza acoplados (ver Fig.4).

En el sistema de limpieza, las colas analizan 18% de calcopirita ($CuFeS_2$) y son recicladas al sistema de flotación primaria.

La carga circulante está formada por alimentación fresca y alimentación reciclada, y la relación entre ellas es de 0,20.

La alimentación nueva o fresca contiene 9,5% de $CuFeS_2$ y es alimentada a razón de 1000t/hr.

PREGUNTAS

1. Calcular los pesos y los análisis de las demás corrientes:

SOLUCION

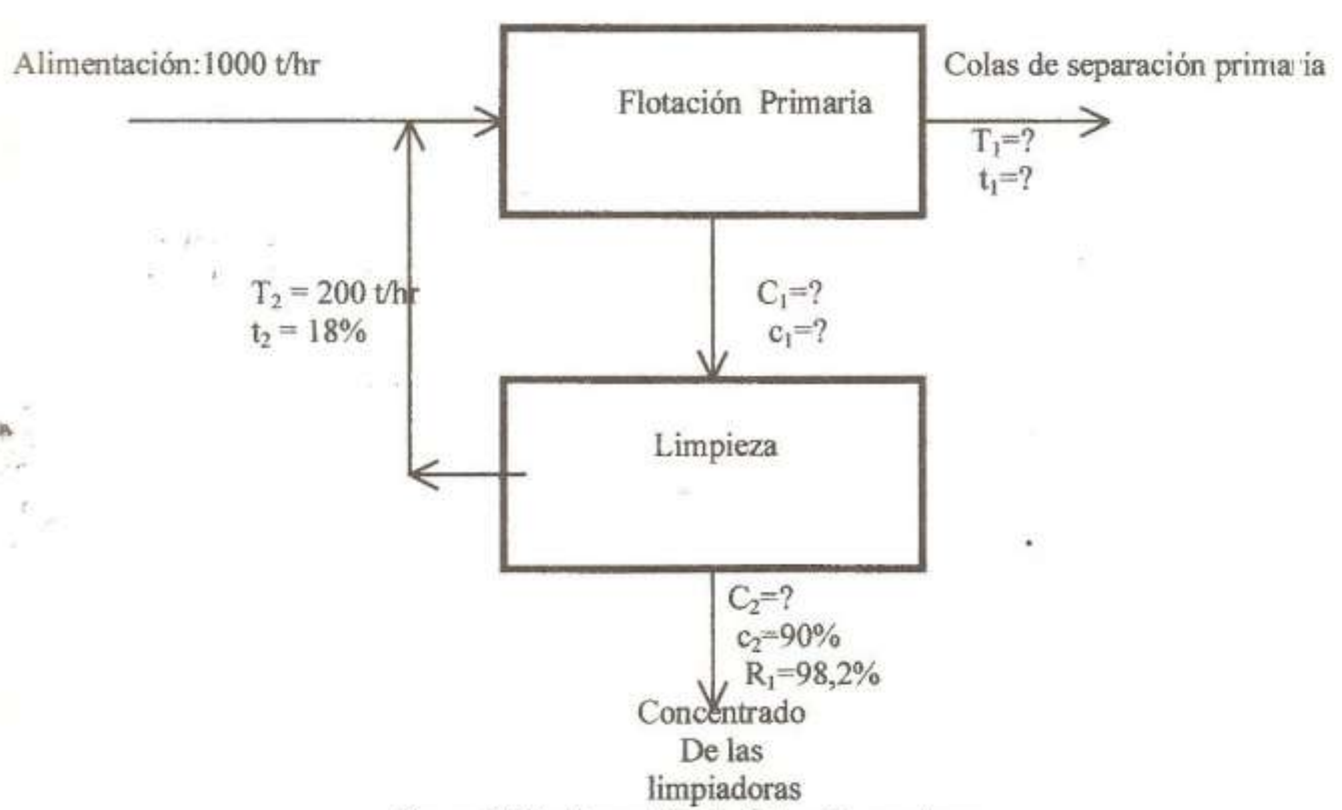


Figura N° 4: Operación de flotación en etapas.

1.

Sea:

C_1 = peso del concentrado de flotación primaria
T_1 = peso de las colas de flotación primaria
c_1 = ley del concentrado de flotación primaria
t_1 = ley de las colas de flotación primaria
C_2 = peso del concentrado de la etapa de limpieza
T_2 = peso de las colas de la etapa de limpieza
c_2 = ley del concentrado de la etapa de limpieza

Balance de masa total en la flotación primaria:

$$1000 + 200 = C_1 + T_1 \quad \text{(a)}$$

Balance de masa total en la etapa de limpieza:

$$C_1 = 200 + C_2 \quad \text{(b)}$$

Balance parcial para $CuFeS_2$ en flotación primaria:

$$1000x9,5\% + 200x18\% = C_1 \cdot c_1 + T_1 \cdot t_1 \quad \text{(c)}$$

Balance parcial para $CuFeS_2$ en la etapa de limpieza:

$$C_1 \cdot c_1 = C_2 \cdot 90\% + 200 \cdot 18\% \quad \text{(d)}$$

R_1 = razón de concentración

R_1 = relación entre masa de $CuFeS_2$ en el concentrado de limpieza y en Alimentación fresca, multiplicada por 100.= 98.2%

$$98,2\% = \{(C_2 \cdot 90\%)/1000 \cdot 9,5\%)\} \cdot 100 \quad \text{(e)}$$

Resolviendo (e):

C_2 = 98,2x1000x9,5/100x90 = 103,66 t/hr. (25-1)

Sustituyendo en (b):

C_1 = 200 + 103,66 = 303,66 t/hr. (25-1)

Sustituyendo este valor en (a):

T_1 = 1200-303,66 = 896,34 t/hr (25-1)

Reemplazando en (d):

c_1 = (103,66x90+288x18)/303,66 = 42,58% (25-1)

Dando valores a (c):

$t_1 = \{(1000x9{,}5+200x18)-(303{,}66x42{,}58)\}/896{,}34 = 0{,}19\%$ (25-1)

EJERCICIO N° 26

Un concentrador por flotación (6), se alimenta con 1040,64 Kg./hr de un mineral que contiene 2n76% de calcopirita ($CuFeS_2$).

Los análisis de los productos finales fueron los siguientes (ver Fig.5):

Concentrado.......... 10,35% $CuFeS_2$
Colas...................... 1,61% $CuFeS_2$

PREGUNTAS

1. Calcular las cantidades de los productos finales obtenidos por hora de operación:

SOLUCION

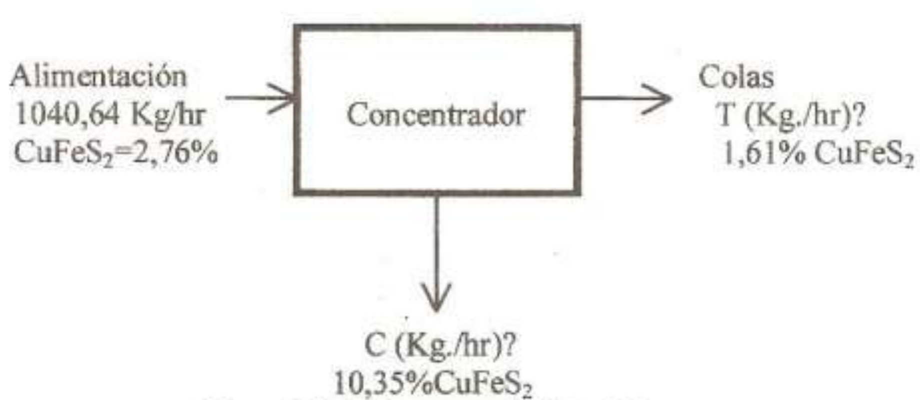


Figura N° 5: Esquema de flotación

Sea:

F = alimentación al sistema de flotación
C = concentrado
T = colas de flotación

Balance general:

$F = C + T \therefore$
$1040{,}64 = C + T$ (a)

La calcopirita que se alimenta, se distribuye en el concentrado y las colas, por tanto, su balance será;

$1040{,}64x0{,}0276 = 0{,}1035C + 0{,}0161T$ (b)

Despejando de (a):

$T = 1040{,}64 - C$

Sustituyendo en (b):

$1040{,}64x0{,}0276 = 0{,}1935C + 0{,}0161(1040{,}64-C) \therefore$
$C = (1040{,}64x0{,}0276-0{,}0161x1040{,}64)/(0.1035-0{,}0161) = 136{,}93$
$T = 1040{,}64-136{,}93 = 903{,}71$

C = 136,93 Kg./hr (26-1)
T = 903,71 Kg./hr (26-1)

EJRCICIO N° 27

Con los datos del ejercicio anterior:

PREGUNTAS

1. Determinar los flujos horarios del cobre: en la alimentación, el concentrado y las colas.

SOLUCION

1.

Peso atómico del Cu = 64
Peso molecular del $CuFeS_2$ = 184

Cu en alimentación = 1040,64x0,0276·(64/184) = 9,99
Cu en concentrado = 136,93x0,1035·(64/184) = 4,93
Cu en colas = 903,71x0,0161·(64/184) = 7,06

Así el flujo será:

Cu en alimentación = 9,99 Kg./hr (27-1)
Cu en concentrado = 4,93 Kg./hr (27-1)
Cu en colas = 5,06 Kg./hr (27-1)

CAPITULO III

REACIONES QUIMICAS
ESTEQUIOMETRIA
REACCIONES CON GASES

EJERCICIO N°1 (7)

Un convertidor de cobre recibe una carga de 60 toneladas métricas de mata que contiene 54% de FeS. El FeS es oxidado por soplo de aire al convertidor, de acuerdo a la siguiente reacción:

$$2\ FeS + 3\ O_2 = 2\ FeO + 2\ SO_2$$

El aire contiene 21% de oxígeno en volumen, una tonelada métrica tiene 1000 Kg.

PREGUNTAS

1. Calcular el volumen total de aire necesario.
2. Calcular el volumen de SO_2 formado.
3. Calcular los kilogramos de FeO formados.
4. Calcular el peso de la escoria formada, en toneladas métricas, si el FeO constituye el 65% de la escoria.

SOLUCION

1.

Para resolver este punto, debemos calcular el oxígeno requerido por la reacción, para luego convertirlo en aire:

Pesos atómicos:

O = 16, Fe = 56, S = 32

Una mol de gas, expresada en kilogramos, ocupa 22,4 m^3.

Pesos moleculares:

FeS = 56+32 = 88
FeO = 56+16 = 72
SO_2 = 32+2x16 = 64

100 → 54% FeS
Kg 60.000 → Kg FeS
Kg FeS = 60000×54/100 = 32400 Kg.

De acuerdo a la reacción:

2x88 Kg. de FeS reaccionan con 3x22,4 m^3 de O_2, los 32400 Kg. de FeS, lo harán con x.

x = O_2 = 32400x67,2/176 = 12371 m^3 ∴≈ 12.400

Aire = 12400/0,21 = 58910 m^3

Aire requerido = 58910 m^3 (1-1)

2.

El razonamiento utilizado para calcular el O_2 a partir del FeS, en válido para calcular el SO_2

SO_2 = 32400x2x22,4/176 = 8247,3 m^3

A este mismo resultado se llega, comparando el O_2 con el SO_2, debido a que por estar ambos en estado gaseoso, se relacionan mol a mol, así:

3x22,4 m^3 de O_2 producen 2x22,4 m^3 de SO_2, cuantos m^3 de este, producirán 12371 m^3 de O_2?

SO_2 = 12371·(2x22,4/3x22,4) =8247,3 m^3

Volumen de SO_2 = 8247,3 m^3 (1-2)

3.

2x88 Kg. de FeS producen 2x72 Kg. de FeO, cuanto FeO producirán los 32400 Kg. de FeS?

FeO = 32400·(144/176) = 26510 Kg.

FeO formado = 26510 Kg. (1-3)

4.

FeO formado = 26510 Kg. = 26,51 ton.

Escoria formada = 26,51/0,65 = 40,78 ton.

Escoria formada = 40,78 ton. (1-4)

EJERCICIO N° 2 (7)

El óxido de hierro es reducido a hierro en un horno eléctrico, de acuerdo a la siguiente reacción:

$$4\ Fe_2O_3 + 9\ C = 8\ Fe + 6\ CO + 3\ CO_2$$

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de Fe_2O_3 que deben ser reducidos para producir una tonelada métrica de Fe.

2. Los kilogramos de carbono requeridos.
3. Los metros cúbicos de CO y CO_2, producidos a condiciones normales.
4. Los kilogramos de CO y CO_2 producidos.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Fe = 56, C = 12, O = 16.

Pesos moleculares:

Fe_2O_3 = 56x2+16x3 = 160

CO = 12+16 = 28

CO_2 = 12+2x16 = 44

1 tonelada métrica = 1000 Kg.

A condiciones normales, una mol de gas expresada en Kg. ocupa 22,4 m^3.

4x160 Kg. de Fe_2O_3 producen de acuerdo a la reacción 8x56 Kg. de Fe, cuanto Fe_2O_3 se requerirán para producir 1000 Kg. Fe?:

Fe_2O_3 = 1000·(160x4/8x56) = 1428,6

Fe_2O_3 reducido = 1428,6 Kg. (2-1)

2.

4x160 Kg. de Fe_2O_3 reaccionan con 9x12 Kg. de C, de acuerdo a la reacción. Con cuanto C reaccionarán los 1428,6 Kg. de Fe_2O_3 reducidos?:

C = 1428,6·(9x12/4x160) = 241

C requerido = 241 Kg. (2-2)

3.

8x56 Kg. de Fe se producen junto con 6x22,4 m^3 de CO. Cuanto CO se producirá en condiciones normales cuando de produzcan 1000 Kg. de Fe?

CO = 1000·(6x22,4/8x56) = 300

CO_2 = 1000·(3x22,4/6x22,4) = 150

CO producido (CN) = 300 m^3 (2-3)

CO_2 producido (CN) = 150 m^3 (2-3)

4.

6x28 Kg. de CO equivalen a 2x22,4 m^3 de este gas. 300 m^3 a cuantos Kg. equivaldrán?

CO = 300·(6x28/6x22,4) = 375

CO_2 = 150·(44/22,4) = 294,6

CO = 375 Kg. (2-4)

CO_2 = 294,6 Kg. (2-4)

EJERCICIO Nº 3 (7)

Una carga en una retorta de cinc produce 50 libras de cinc. La carga consiste de un mineral que contiene 56%ZnO, 44% ganga y carbón que contiene 90%C y 10% cenizas.

La reducción tiene lugar de acuerdo con la siguiente reacción:

ZnO + C = Zn + CO

Se utiliza suficiente carbón como para consumir 5 veces tanto C como el que requiere la reacción.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral en la carga, en libras.
2. El porcentaje de carbón en la carga
3. El volumen de CO expulsado, en pie cúbico.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Zn = 65, C = 12, O = 16

Pesos moleculares:

ZnO = 65+16 = 81

$CO = 12+16 = 28$

En condiciones normales, una mol de un gas (expresada en libras), ocupa 359 pies cúbicos.

De acuerdo a la estequiometría de la reacción: 65 libras de Zn son producidas por 81 libras de ZnO, para producir 50 lbs de Zn se necesitan:

$ZnO = 50\cdot(81/65) = 62{,}3$ lbs

Mineral $= 62{,}3/0{,}56 = 111$

Mineral = 111 lbs (3-1)

2.

Calculamos el C de la reacción:

12 lbs de C producen 65 de Zn, las 50 lbs de Zn necesitarán:

$C = 50\cdot(12/65) = 9{,}22$ lbs.

Total C cargado $= 9{,}22x5 = 46{,}1$ Lbs.

Total carbón en la carga $= 46{,}1/0{,}9 = 51{,}3$ lbs.

Carga total $= 111+51{,}3 = 162{,}3$ lbs.

Carbón en la carga $= (51{,}3/162{,}3)\cdot 100 = 31{,}5\%$

Carbón en la carga = 31,5% (3-2)

3.

De acuerdo a la reacción, 12 lbs de C producen una mol (359 ft^3) de CO, las 9,22 lbs de C deberán producir:

$CO = 9{,}22\cdot(359/12) = 275{,}8$

CO expulsado = 275,8 ft^3 (3-3)

EJERCICIO Nº 4 (7)

Se reduce plomo a partir de la galena (PbS) en un horno de hogar para minerales, por reacción del PbS con PbO en una reacción, y del PbS con $PbSO_4$ en otra reacción. En ambos casos se forman Pb y SO_2, pero se producen 3 veces más Pb por la reacción del PbO que por la del $PbSO_4$, las dos reacciones tienen lugar simultáneamente.

El peso del PbS reducido en las dos reacciones es de 6600 Kg.

PREGUNTAS

1. El peso total de plomo (Pb) resultante de las dos reacciones, y el peso (Kg.) y el volumen (m^3) del SO_2 producido.
2. Los porcentajes de PbO y $PbSO_4$ contenidos en la mezcla PbS-PbO-$PbSO_4$.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

$Pb = 207,\ S = 32,\ O = 16$

Pesos moleculares:

$PbS = 207+32 = 239$

$PbO = 207+16 = 223$

$PbSO_4 = 207+32+16x4 = 303$

$SO_2 = 32+16x2 = 64$

En condiciones normales, una mol de un gas (en Kg.), ocupa 22,4 m^3 de volumen.

Dado que las reacciones ocurren simultáneamente, las podemos representar en una sola, así:

1) $PbS + 2PbO = 3Pb + SO_2$

2) $PbS + PbSO_4 = 2Pb + 2SO_2$

3) $2PbS + 2PbO + PbSO_4 = 5Pb + 3SO_2$

En razón de que el Pb en (1) es 3 veces el Pb en (2), las reacciones se pueden volver a escribir así:

1) $2PbS + 4PbO = 6Pb + 2SO_2$
2) $PbS + PbSO_4 = 2Pb + 2SO_2$
3) $3PbS + 4PbO + PbSO_4 = 8Pb + 4SO_2$

Dado que disponemos de 6600 Kg. de PbS, utilizando la estequiometría de la reacción (3) se puede calcular el peso total del Pb producido, al igual que el peso y el volumen del SO_2.

Pb total = 6600·(8x207/3x239) = 15243,5 Kg.

Peso total del Pb = 15243,5 Kg. (4-1)

Peso del SO_2 = 6600·(4x64/3x239) = 2356,5 Kg.

Peso del SO_2 = 2356,5 Kg. (4-1)

Volumen del SO_2 = 2356,5·(22,4/64) = 824,8 m^3

Volumen del SO_2 = 824,8 m^3 (4-1)

2.

De nuevo, para calcular los respectivos pesos de PbO y $PbSO_4$, recurrimos a el balance estequiométrico de la reacción (3):

Peso del PbO = 6600·(4x223/3x239) = 8210,9 Kg.
Peso del $PbSO_4$ = 6600·(303/3x239) = 2789,1 Kg.
Carga total = PbS + PbO + $PbSO_4$
Carga total = 6600 + 8210,9 + 2789,1 = 17600 Kg.
PbO = 100·(8210,9/17600) = 46,6%
$PbSO_4$ = 100·(2789,1/17600) = 15,8%

PbO = 46,6% (4-2)
$PbSO_4$ = 15,8% (4-2)

EJERCICIO Nº 5

Un mineral de cobre contiene 6%Cu y 35%S.

El mineral de cobre es calcopirita ($CuFeS_2$), y el S también está presente como pirita de hierro (FeS_2). El resto del mineral es ganga que no contiene Cu, Fe ni S.

Este mineral es tostado hasta que todo el S sea removido, de conformidad con las reacciones siguientes:

1) $4\,FeS_2 + 11\,O_2 = 2\,Fe_2O_3 + 8\,SO_2$
2) $4\,CuFeS_2 + 13\,O_2 = 4\,CuO + 2\,Fe_2O_3 + 8\,SO_2$

La cantidad de oxígeno suministrada al horno (contenido en el aire), es 200% en exceso de la cantidad demandada por las reacciones.

PREGUNTAS

1. El peso en libras de c/u de las especies minerales mencionadas y también de la ganga, en una tonelada corta de mineral.
2. Los pies cúbicos de oxígeno, requerido por las reacciones en la tostación de una tonelada corta de mineral.
3. Los pies cúbicos de aire realmente suministrado, por tonelada de mineral.
4. El peso total de Fe_2O_3, y el volumen total de SO_2 producidos en la tostación de una tonelada de mineral.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Fe = 56, S = 32, O = 16, Cu = 64

Pesos moleculares:

FeS_2 = 56+32x2 = 120
Fe_2O_3 = 56x2+16x3 = 160

$SO_2 = 32+16x2 = 64$
$CuFeS_2 = 64+56+32x2 = 184$
$CuO = 64+16 = 80$

1 tonelada corta = 2000 lbs.

En C.N, el peso molecular de un gas, en libras, ocupa 359 ft^3

Dado que conocemos la cantidad de Cu cargada y este solo se encuentra como calcopirita, podemos determinar al peso de esta especie mineral:

Cu total cargado = 2000xo,06 = 120 lbs.
S total cargado = 2000x0,35 = 700 lbs.
$CuFeS_2 = 120\cdot(184/64) = 345$ lbs.

$CuFeS_2$ = 345 lbs (5-1)

En la carga, el S que no se encuentra como $CuFeS_2$, se encuentra como pirita (FeS_2), de manera que si determinamos el S de la pirita, también podemos determinar su peso:

S en $CuFeS_2 = 345\cdot(64/184) = 120$ lbs
S en $FeS_2 = 700-120 = 580$ lbs
$FeS_2 = 580\cdot(120/64) = 1088$ lbs.

FeS_2 = 1088 lbs. (5-1)

Ganga = Mineral total-$CuFeS_2$-FeS_2
Ganga = 2000 – 1088 – 345 = 567 lbs.

Ganga = 567 lbs. (5-1)

2.

Debemos determinar el oxígeno requerido por c/u de las reacciones por separado, y luego establecer la sumatoria:

En la reacción (1):

$O_2 = 1088\cdot(11x359/4x120) = 8951,1$ ft^3

En la reacción (2):

$O_2 = 345\cdot(13x359/4x184) = 2187,7$ ft^3

O_2 total requerido por las reacciones de tostación = 8951,1+2187,7 = 11138,8 ft^3

O_2 de reacciones = 11138,8 ft^3 (5-2)

3.

Dado que el aire contiene 21%O_2 en volumen, y el del exceso fue 2 veces (200%) del requerido por las reacciones, el aire total será:

Aire total = $3\cdot(11138,8/0,21) = 159126$ ft^3.

Aire realmente utilizado = 159126 ft^3 (5-3)

4.

Debemos determinar respectivamente el Fe_2O_3 y el SO_2 para c/u de las reacciones, tomando como referencias el CuFeS2, el FeS2 y el oxígeno, y establecer luego la sumatoria:

Fe_2O_3 en (1) = $1088\cdot(2x160/4x120) = 725,3$ lbs
Fe_2O_3 en (2) = $345\cdot(2x160/4x184) = 150$ lbs
Total Fe_2O_3 = 725,3+150 = 875,3 lbs.

Fe_2O_3 total = 875,3 lbs. (5-4)

SO_2 en (1) = $8951,1\cdot(8/11) = 6510$ ft^3
SO_2 en (2) = $2187,7\cdot(8/13) = 1346$ ft^3
Total SO_2 = 6510+1346 = 7856 ft^3

SO_2 total = 7856 ft^3 (5-4)

EJERCICIO Nº 6 (7)

Se produce aluminio por descomposición electrolítica del Al_2O_3, utilizando un ánodo de carbono.

El oxígeno liberado cuando se descompone el Al_2O_3, se combina con el carbono del ánodo. Asumir que 85% de los gases es CO y el 15% es CO_2.

La producción diaria de una celda es de 400 lbs de aluminio.

PREGUNTAS

1. La reacción química que ocurre, balanceada con los números enteros mínimos.
2. Las libras de Al_2O_3 consumidos por día en cada celda.
3. Los pies cúbicos de CO y CO_2 producidos por día.

SOLUCION

1.

El balanceo natural de la reacción es el siguiente:

1) $Al_2O_3 + 2\ C = 2\ Al + CO + CO_2$

Se advierte que el 85% del gas es CO y el 15% es CO_2, por tanto, estos gases deben aparecer en la reacción con la siguiente proporción:

$CO:CO_2 = 85:15 = 5{,}6667 = 5{\cdot}2/3 = 17/3$

El balanceo parcial pues, considerando solo los gases será:

2) $Al_2O_3 + 20/3\ C = 2\ Al + 17/3\ CO + 3/3\ CO_2$

El balance para el oxígeno sería:

Oxígeno del CO = 17/3

Oxígeno del $CO_2 = (3/3)x2 = 6/3$

Total oxígeno en gases = 17/3+6/3 = 23/3

Dado que el Al_2O_3 contiene 3 átomos de oxígeno, los 23/3 debemos dividirlos por 3, y la reacción quedaría balanceada en relación al oxígeno así:

3) $(23/3)\cdot(1/3)\ Al_2O_3 + 20/3\ C = 2\ Al + 17/3\ CO + 3/3\ CO_2$. ó:

3) $(23/9)Al_2O_3 + 20/3\ C = 2\ Al + 17/3\ CO + 3/3\ CO_2$

Si expresamos todos los quebrados en novenos, multiplicando y dividiendo por 3 a las que contienen tercios, y balanceando para el Al, nos resulta:

4) $(23/9)Al_2O_3 + 60/9\ C = 46/9\ Al + 51/9\ CO + 9/9\ CO_2$.

Si multiplicamos todo por 9:

5) $207\ Al_2O_3 + 540\ C = 414\ Al + 459\ CO + 81\ CO_2$.

Como todos los coeficientes estequiométricos son múltiplos de 9, puedo encontrar los mínimos números enteros, dividiendo otra vez por 9:

6) **$23\ Al_2O_3 + 60C = 46\ Al + 51\ CO + 9\ CO_2$** (6-1)

2.

Pesos atómicos:

Al = 27, O = 16, C = 12

Pesos moleculares:

$Al_2O_3 = 27x2+16x3 = 102$

CO = 12+16 = 28

$CO_2 = 12+16x2 = 44$

En C.N, una mol de gas expresada en libras, ocupa 359 ft^3.

Si nos acogemos a las relaciones estequiométricas de (6), podemos calcular el peso de Al_2O_3 consumido por día en cada celda:

$Al_2O_3 = 400 \cdot (23x102/46x27) = 755{,}6$ lbs.

Al_2O_3 consumido = 755,6 lbs (6-2)

3.

De nuevo, hacemos uso de las relaciones estequiométricas de (6):

$CO = 400 \cdot (51x359/46x27) = 5896{,}62\ ft^3$

$CO_2 = 400 \cdot (9x359/46x27) = 1040{,}58\ ft^3$

CO producido por día = 5896,62 ft^3 (6-3)

CO_2 producido por día = 1040,58 ft^3 (6-3)

Se puede comprobar, que si el gas total es 6937,20 ft^3, se sigue conservando la proporción inicial: CO = 85% y CO_2 = 15%.

EJERCICIO Nº 7 (7)

El azufre contenido en el acero como FeS, es removido en un horno eléctrico por adición de cal y ferro-silicio, tiene lugar la siguiente reacción:

$$2CaO + 2FeS + Fe_xSi = SiO_2 + 2CaS + (x+2)Fe$$

en la cual, el ferro-silicio está representado por Fe_xSi.

PREGUNTAS

1. Si el ferrosilicio contiene 50%Fe y 50%Si, que valor de "x" en la fórmula Fe_xSi satisfará esa composición?

2. Cuantas libras de cal y cuantas de ferro-silicio serán requeridas para remover 100 libras de azufre?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Fe=56, Si=28, S=32, O=16, Ca=40

Pesos moleculares:

CaO = 40+16 = 56
CaS = 40+32 = 72
FeS = 56+32 = 88

De acuerdo a la composición propuesta, debe cumplirso la siguiente relación:

$Fe(x) : Si = 50 : 50 \therefore$
$56(x) : 28 = 50 : 50 \therefore$

x = 28/56 = 0,5, por tanto, el valor de x que se ajusta ala composición será:

x = 0,5 (7-1)

La fórmula del ferro-silicio será $Fe_{0,5}Si$..

2.

El peso molecular del ferro-silicio será:

$Fe_{0,5}Si = 56x0,5 + 28 = 56$

Para calcular los pesos de la cal y del ferro-silicio consumidos, debemos recurrir a la estequiometría de la reacción:

$$2CaO + 2FeS + Fe_{0,5}Si = SiO_2 + 2CaS + 2,5Fe$$

En base al S removido, calculamos el CaS producido para poder relacionar con este, las fórmulas de los compuestos solicitados, de acuerdo a como aparecen en la reacción ajustada:

CaS producido = 100·(72/32) = 225 lbs
CaO consumido = 225·(56/72) = 175 lbs
$Fe_{0,5}Si$ consumido = 225·(56/2x72) = 87.5 lbs

CaO consumido = 175 lbs (7-2)
$Fe_{0,5}Si$ consumido = 87,5 lbs (7-2)

EJERCICIO Nº 8 (7)

En un alto horno, la hematita (Fe_2O_3) es reducida por el monóxido de carbono, el cual es formado por la combustión del carbono en el coque por medio de un soplo de aire.

Las condiciones de equilibrio químico requieren que haya un exceso de CO presente para hacer que la reacción de reducción proceda de izquierda a derecha. La reacción puede estar representada de la menera siguiente:

$$Fe_2O_3 + xCO = 2Fe + 3CO_2 + (x-3)CO$$

En un cierto horno, la relación $CO:CO_2$ en los productos de la reacción arriba mencionada fue de 1,8:1, en volumen.

El horno redujo 800 toneladas métricas de hierro por día.

PREGUNTAS

1. La ecuación que representa la reducción, con CO y CO_2 formados en la relación 1,8:1, balanceada con los mínimos números enteros.

2. Los metros cúbicos de CO y CO_2 producidos por día.

3. El consumo teórico de coque, por tonelada métrica de Fe reducido; asumiendo que el coque contiene 90%C.

4. Los metros cúbicos del soplo (aire), necesarios para la combustión del carbono en el coque a CO; por tonelada de Fe reducido.

5. Si se carga al horno un peso de piedra caliza ($CaCO_3$) igual a 1/5 de la cantidad de Fe_2O_3 reducido, cual será la relación real de $CO:CO_2$ en los gases del horno, después de sumar el CO_2 resultante de la descomposición del $CaCO_3$ en CaO y CO_2?

SOLUCION

1.

La relación $CO:CO_2$ es igual a 1,8:1, esto se puede escribir así:
$CO:CO_2 = 1{,}8:1$, o también:
$(x-3)/3 = 1{,}8 \therefore$
$x = 3x1{,}8+3 = 8{,}4$.
La reacción se convierte entonces en

$$Fe_2O_3 + 8{,}4CO = 2Fe + 3CO_2 + 5{,}4CO$$

Si multiplicamos por 5 con el objeto de eliminar decimales, y expresar la reacción con los mínimos enteros, tendremos:

$$\mathbf{5Fe_2O_3 + 42CO = 10Fe + 15CO_2 + 27CO} \quad (8\text{-}1)$$

2.

Sabemos que una tonelada métrica = 1000 Kg, por tanto, el Fe reducido fue = 800000 Kg., y que en C.N, una mol de gas expresada en Kg. ocupa 22,4 m^3, por tanto:

CO producido por día = $800000\cdot(27x22{,}4/10x56) = 864000\ m^3$
CO_2 producido por día = $864000\cdot(15/27) = 480000\ m^3$
CO producido por día = 864000 m^3 (8-2)
CO_2 producido por día = 480000 m^3 (8-2)

3.

Para determinar el consumo de coque, debemos calcular el C que se encuentra en CO y CO_2, una vez hecha esta determinación, consideramos el hecho de que el coque contiene 90%C. Para determinar el CO y el CO_2, procedemos como en los cálculos del punto anterior, solo que esta vez, el Fe reducido son 1000 Kg.

CO producido = $1000\cdot(27x22{,}4/10x56) = 1080\ m^3$
CO_2 producido = $1000\cdot(15x22{,}4/10x56 = 600\ m^3$
C en CO = $1080\cdot(12/22{,}4) = 578{,}6$ Kg.
C en CO_2 = $600\cdot(12/22{,}4) = 321{,}4$ Kg.
C(total) = 578,4+321,6 = 900 Kg.
Coque consumido = 900/0,9 = 1000 Kg.
Coque consumido por tonelada métrica de Fe reducido = 1000 Kg. (8-3)

4.

El CO_2 producido, por tonelada métrica de Fe reducido se considera que proviene de la reacción de oxidación del CO, así:

$CO + ½ =O_2 = CO_2 \therefore CO = CO_2 = 600\ m^3$
CO (total) = 1080 + 600 = 1680 m^3

En el alto horno, el C forma CO y parte de este luego forma CO_2, por tanto, el O_2 consumido proviene de la siguiente reacción:

$C + ½\, O_2 = CO \therefore$
$O_2 = ½\, CO = 1680x0{,}5 = 640\ m^3$

Recordando que el aire contiene 21% O_2 en volumen:

Aire necesario = 840/0,21 = 4000 m^3

Aire necesario para combustión del C = 4000 m^3 (8-4)

5.

Debemos calcular el Fe_2O_3 cargado, a partir del Fe reducido para luego determinar el peso de la piedra caliza, luego descomponemos esta en CaO y CO_2, este CO_2 se lo adicionamos al proveniente del CO para finalmente establecer la relación CO:CO_2.

Pesos atómicos:

C = 12, Ca = 40, Fe = 56, O = 16

Pesos moleculares:

Fe_2O_3 = 56x2+16x3 = 160

CaCO3 = 40+12+16x3 = 100

Fe_2O_3 cargado = 800000·(160/112) = 1'142.857 Kg.

$CaCO_3$ adicionada = 1'142.857/5 = 228571 Kg.

Reacción de descomposición:

$CaCO_3$ + calor = CaO + CO_2

CO_2 de esta reacción = 228571·(22,4/100) = 51200 m^3

Total CO_2 = 480000 + 51200 = 531200 m^3

CO/CO_2 = 864000/531200 = 1,63

Relación CO:CO_2 = 1,63:1 (8-5)

EJERCICIO Nº 9 (7)

Una retorta para zinc es cargada con 70 Kg. de concentrado de Zn tostado, conteniendo 45%Zn presente como ZnO. La reducción tiene lugar de acuerdo con la reacción

ZnO + C = Zn + CO

1/5 del ZnO permanece sin reducir.

Los vapores de Zn y CO pasan a través de un condensador, del cual escapa el CO y se quema a CO_2 cuando sale de la boca del condensador.

El CO entra al condensador a 300ºC y 700 mm de presión.

PREGUNTAS

1. El volumen de CO en metros cúbicos que entra al condensador (a) medido a condiciones normales, y (b) medidos a las condiciones dadas.

2. El peso del CO en kilogramos.

3. El volumen de CO_2 formado cuando se quema el CO, medido a su temperatura de 750ºC y 765 mm de presión.

4. El volumen (a condiciones normales), y el peso del aire utilizado para quemar el CO.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Zn = 65, C = 12, O = 16

Pesos moleculares:

ZnO = 65+16 = 81

CO = 16+12 = 28

Aire = 29

Debemos calcular el peso del Zn y/o del ZnO que intervienen en la reacción de reducción y a partir de allí determinar el peso del CO a C.N y luego pasarlo a las condiciones dadas.

Zn = 70x0,45 = 31,5 Kg.

ZnO de este = 31.5·(81/65) = 39,2 Kg.

ZnO reducido = 39,2x(4/5) = 31,4 Kg.

Este será el ZnO que interviene en la reacción, pues 1/5 permanece sin reducir.

Los cálculos realizados en base a las relaciones estequiométricas de las reacciones, se supone que son a condiciones normales, así:

$CO = 31{,}4 \cdot (22{,}4/81) = 8{,}68\ m^3$

CO(C.N) = 8,68 m^3 (9-1.a)

Para realizar el cambio de estado, recordemos que si se asume un comportamiento ideal para estos gases, y en número de moles permanece constante, el cambio de estado se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}. \qquad (1)$$

donde las condiciones (1) y (2) representas estados diferentes.

Sea el estado (1), las condiciones normales y las (2) las reales:

$T_1 = 273K$, $T_2 = 273+300 = 573K$

$P_1 = 760\ mm$, $P_2 = 700\ mm$

$V_1 = 8{,}68\ m^3$, $V_2 = ?$

$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2)$

$V_2 = 8{,}68 \cdot (760/273) \cdot (573/700) = 19{,}7\ m^3$

Volumen a condiciones reales = 19,7 m^3 (9-1.b)

2.

El peso del CO se calcula a partir de las condiciones normales, en base a su densidad o en base al hecho de que una mol de gas expresada en Kg., siempre ocupa un volumen de 22,4 m^3, C.N.

Densidad del CO = 1,250 Kg/m^3 ∴

$CO = 8{,}68\ m^3 x 1{,}250\ (Kg/m^3) = 10{,}85\ Kg.$

$CO = 8{,}68\ m^3 \cdot (28Kg/22{,}4m^3) = 10.85\ Kg.$

Peso del CO = 10,85 Kg. (9-2)

3.

La reacción para la combustión del CO es la siguiente:

$$CO + ½ O_2 = CO_2$$

A partir de la estequiometría de esta reacción (C.N) se puede deducir que el volumen de CO es el mismo que el del $CO_2 = 8{,}68\ m^3$, por tanto, para cambiar de estado podemos hacer uso de (1):

$T_1 = 273K$, $T_2 = 750+273 = 1023K$

$P_1 = 760\ mm$, $P_2 = 765\ mm$

$V_1 = 8{,}68\ m^3$, $V_2 = ?$

$V_2 = 8{,}68 \cdot (760/273) \cdot (1023/765) = 32{,}2\ m^3$

CO_2 formado a condiciones dadas = 32,2 m^3 (9-3)

4.

Se puede deducir de la reacción de combustión del CO, que el volumen del O_2 = ½ CO = 8,68x0,5 = 4,34 m^3. Con este valor podemos calcular el volumen de aire a C.N tomando en cuenta que el 21% del volumen de aire es O_2, y el peso se puede determinar tomando en consideración que su densidad es = 1,293 Kg/m^3, ó que una mol de aire pesa 29.

Aire (C.N) = 4,34/0,21 = 20,6 m^3

Peso del aire = 20,6x1,293 = 20,6 · (29/22,4) = 26,6 Kg.

Volumen de aire (C.N) = 20,6 m^3 (9-4)

Peso del aire = 26,6 Kg. (9-4)

EJERCICIO Nº 10 (8)

Dada la reacción

$$BaCl_2 + Na_2SO_4 = 2NaCl + BaSO_4$$

PREGUNTAS

1. Cuantos gramos de cloruro sódico, reaccionarán con 5,0 gramos de sulfato sódico?

2. Cuantos gramos de cloruro bárico, se necesitan para precipitar 5,0 gramos de sulfato bárico?

3. Cuantos gramos de cloruro bárico, son equivalentes a 5,0 gramos de cloruro sódico?

4. Cuantos gramos de sulfato sódico, se necesitan para la precipitación del bario de 5,0 gramos de cloruro bárico?

5. Cuantos gramos de Na_2SO_4 han sido añadidos al $BaCl_2$, si han precipitado 5,0 gramos de $BaSO_4$?

6. Cuantas libras de Na_2SO_4 son equivalentes a 5 libras de $NaCl_2$?

7. Cuantas libras de $BaSO_4$ se precipitan con 5,0 libras de cloruro bárico?

8. Cuantas libras de $BaSO_4$ se precipitan con 5,0 libras de Na_2SO_4?

9. Cuantas libras de $BaSO_4$ son equivalentes a 5.0 libras de $NaCl_2$?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Ba =137,36; Cl = 35,457; Na = 22,991; S = 32,006; O = 16

Pesos moleculares:

$BaCl_2$ = 208,274; Na_2SO_4 = 141,988

NaCl = 58,448; $BaSO_4$ = 233,366

Basándonos en la estequiometría de la reacción, una mol de cloruro bárico reacciona con una mol de sulfato sódico, los 5 gramos de sulfato sódico con cuantos gramos de cloruro bárico reaccionarán. Esto se calcula así:

$BaCl_2$ = 5x(208,274/141,988) = 7,334 g.

$BaCl_2$ = 7,334 g. (10-1)

2.

Razonando del mismo modo anterior, solo que en este caso los 5 gramos son de sulfato bárico.

$BaCl_2$ = 5x(208,274/233,366) = 4,462 g

$BaCl_2$ = 4,462 g. (10-2)

3.

De nuevo recurrimos a la estequiometría de la reacción, para determinar cuantos gramos de cloruro bárico, son equivalentes en esa reacción a 5 de cloruro de Na.

$BaCl_2$ = 5x(208,274/2x58,448) = 8,909 g

$BaCl_2$ = 8,909 g. (10-3)

4.

En este caso, debemos calcular el Ba que contiene el $BaCl_2$ y luego determinar que cantidad de Na_2SO_4 lo podría precipitar:

Ba en $BaCl_2$ = 5x(137,36/298,274 = 3,2976 g

Na_2SO_4 = 3,2976 · (141,988/137,36) = 3,409 g

Na_2SO_4 = 3,409g. (10-4)

5.

Na_2SO_4 = 5 · (141,988/233,366) = 3,042 g.

Na_2SO_4 = 3,409 g. (10-5)

6.

Este cálculo es parecido al del punto (3) y procedemos del mismo modo:

Na_2SO_4 = 5 · (141,988/2x58,448) = 6,073 lbs

Na_2SO_4 = 6,073 lbs. (10-6)

7.

Este cálculo es parecido al del punto (2) y procedemos de la misma manera:

$BaSO_4$ = 5 · (233,366/208,274) = 5,602 lbs.

$BaSO_4$ = 5,602 lbs. (10-7)

8.

Procedemos del mismo modo que en el punto anterior:

$BaSO_4 = 5 \cdot (233{,}366/141{,}988) = 8{,}218$ lbs.

$BaSO_4$ = 8,218 lbs. (10-8)

9.

$BaSO_4 = 5 \cdot (233{,}366/2x58{,}448) = 9{,}982$ lbs.

$BaSO_4$ = 9,982 lbs. (10-9)

EJRCICIO Nº 11 (8)

PREGUNTAS

1. Cuantos gramos de sulfuro crómico se formarán a partir de 0,928 gramos de óxido crómico, según la reacción:

$$2Cr_2O_3 + 3CS_2 = 2Cr_2S_3 + 3CO_2$$

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Cr=52,01; O=16; C=12,011; S=32,006

Pesos moleculares:

$Cr_2O_3 = 52{,}01x2+3x16 = 152{,}02$

$Cr_2S_3 = 52{,}01x2+3x32{,}006 = 200{,}038$

Como se puede observar en la reacción, 2 moles de óxido crómico producen 2 moles de sulfuro crómico, la pregunta es; cuanto sulfuro crómico serán producidos mediante la reacción propuesta por 0,928 gramos del primero?

$Cr_2S_3 = 0{,}928 \cdot (200{,}038x2/152{,}02x2) = 1{,}221$ g.

Cr_2S_3 formado = 1,221 g. (11-1)

EJERCICIO Nº 12 (8)

PREGUNTAS

1. Cuanto carbono se necesita para reducir 1,5 libras de trióxido de arsénico?

SOLUCION

1.

La reacción de reducción es la siguiente:

$$As_2O_3 + 3C = 3CO + 2As$$

Pesos atómicos:

As=74,91; C=12,011; O=16

Pesos moleculares:

$As_2O_3 = 74{,}91x2 + 16x3 = 197{,}82$

$C = 1{,}5 \cdot (3x12{,}011/197{,}82) = 0{,}273$ lbs.

C = 0,273 lbs (12-1)

EJERCICIO Nº 13 (8)

El oxígeno se prepara según la reacción:

$$2KClO_3 = 2KCl + 3\ O_2$$

PREGUNTAS

1. Cuanto oxígeno se produce si se descomponen 9,12 gramos de clorato de potasio?
2. Cuantos gramos de clorato de potasio deben descomponerse para liberar 2,5 gramos de oxígeno?.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

K=39,1; Cl=35,457; O=16

Pesos moleculares:

$KClO_3$ = 39,1+35,457+16x3 = 122,557
KCl = 39,1+35,457 = 74,557

La estequiometría de la reacción nos dice que 2 moles de clorato de potasio, producen 3 de oxígeno; por tanto, los 9,12 gramos del primero, al descomponerse deben producir:

O = 9,12 · (3x32/2x122,557) = 3,572 g.
O producido = 3,572 g (13-1)

2.

Para producir 2,5 gramos de oxígeno, deben descomponerse:
$KClO_3$ = 2,5 · (2x122,557/3x32) = 6,383 g.
$KClO_3$ descompuesto = 6,383 g. (13-2)

EJERCICIO Nº 14 (8)

El SO_2 puede producirse mediante la siguiente reacción:

$$Cu + 2H_2SO_4 = CuSO_4 + 2H_2O + SO_2$$

PREGUNTAS

1. Cuanto cobre debe emplearse, para obtener 32 libras de SO_2?
2. Cuanto H_2SO_4 del 94% de pureza debe emplearse, para obtener 32 libras de SO_2?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Cu=63,54; H=1,008; S=32,006; O=16

Pesos moleculares:

H_2SO_4 = 1,008x2+32,006+16x4 = 98,022
$CuSO_4$ = 63,54+32,006+16x4 = 159,546
H_2O = 1,008x2+16 = 18,016
SO_2 = 32,006+16x2 = 64,006

De nuevo, en base a la estequiometría de la reacción, 1 átomo de Cu produce una mol de SO_2; por tanto, para obtener 32 libras de este gas se deben emplear de Cu:

Cu = 32 · (63,34/64,006) = 31,767 lbs.
Cu a emplearse = 31,767 lbs (14-1)

2.

El H_2SO_4 calculado en base a la estequiometría de la reacción, es un compuesto puro; sin embargo se nos advierte que el utilizado (que es el comercial) solo tiene el 94% de pureza; por lo tanto, debemos debemos convertirlo de puro a comercial:

H_2SO_4(de la reacción) = 32 · (2x98,022/64,006) = 98,013 lbs
H_2SO_4(comercial) = 98,013/0,94 = 104,27 lbs.

H_2SO_4 (comercial) = 104,27 lbs (14-2)

EJERCICIO N° 15 (8)

El análisis de una piedra caliza es el siguiente:

$CaCO_3$	94,52%
$MgCO_3$..........	4,16%
Insolubles.......	1,32%

PREGUNTAS

1. Cuantas libras de CaO podrían obtenerse de 4 toneladas de piedra caliza?
2. Cuantas libras de CO_2 se desprenden por cada libra de piedra caliza?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Ca=40; C=12; O=16; Mg=24

Pesos moleculares:

$CaCO_3$ = 40+12+3x16 = 100
CaO = 40+16 = 56
$MgCO_3$ = 24+12+48 = 84
CO_2 = 44

Vamos a suponer que se trata de 4 toneladas cortas de piedra caliza y 1 tonelada corta = 2000 libras.

El CaO de la pregunta, proviene de la descomposición del $CaCO_3$, en base a la reacción:

(1) $CaCO_3 = CaO + CO_2$

Piedra caliza = 4x2000 = 8000 lbs.
$CaCO_3$ = 8000x0,9452 = 7561,6 lbs

De acuerdo a (1):

CaO = 7561,6 · (56/100) = 4234,5 Lbs.

CaO obtenido = 4234,5 lbs (15-1)

2.

A más de la reacción (1), ocurre la siguiente reacción:

(2) $MgCO_3 = MgO + CO_2$

Como se puede observar, el CO_2 se desprende de las reacciones (1) y (2), por tanto:

CO_2(total) = CO_2(1) + CO_2(2).

Como se trata de 1 libra de piedra caliza: $CaCO_3$ = 0,9452 lbs, y $MgCO_3$ = 0,0416 lbs.

CO_2(total) = 0,9452 · (44/100) + 0,0416 · (44/84) = 0,438 lbs

CO_2 desprendido = 0,438 lbs/lb de piedra caliza (15-2)

EJERCICIO Nº 16 (8)

PREGUNTAS

1. Cuantas libras de sal común se necesitan para fabricar 2500 libras de torta de sal (Na_2SO_4)?
2. Cuantas libras de sal de Glauber ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) producirán esta cantidad de torta de sal?

SOLUCION

1.
Pesos atómicos:

Na=23; S=32; O=16; H=1; Cl=35,5

Pesos moleculares:

Sal común = NaCl = 23+35,5 = 58,5
Torta de sal = Na_2SO_4 = 23x2+32+16x4 = 142
Sal de Glauber = $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ = 322

Reacción para la producción de torta de sal:

$$(1) \quad 2NaCl + H_2SO_4 = Na_2SO_4 + 2HCl$$

NaCl = 2500·(2x58,5/142) = 2059,86 lbs
NaCl necesaria = 2060 lbs (16-1)

2.
La producción de la torta de sal, a partir de la sal de Glauber, se produce de acuerdo a la siguiente reacción:

$$(2) \quad Na_2SO_4 \cdot 10H_2O = Na_2SO_4 + 10H_2O$$

Sal de Glauber = 2500·(322/142) = 5669 lbs
Sal de Glauber necesaria = 5669 lbs (16-2)

EJERCICIO Nº 17 (8)

Un compuesto cuyo peso molecular es 103, presentó el siguiente análisis:

C = 81,5%
H = 4,9%
N = 13,6%

PREGUNTAS

1. Cual es la fórmula del compuesto?

SOLUCION

1.
Pesos atómicos:

C=12; H=1; N=14

Lo primero que debemos hacer es calcular el # de átomos que posee cada elemento en el compuesto, para lo cual, por comodidad suponemos que el compuesto pesa 100 gramos, en cuyo caso por ejemplo contendría 81,5 gramos de C. Planteamos una regla de tres que diga: si un átomo de C pesa 12 g (peso atómico); 81,5 gramos de C a cuantos átomos corresponderán?:

C = 85,1/12 = 7,0917 átomos
H = 4,9/1 = 4,9 átomos
N = 13,6/14 = 0,8714 átomos

Luego determinamos la proporción atómica, dividiendo en # de átomos de cada elemento por el menor de ellos, así:

$C = 7{,}0917/0{,}9714 = 7{,}300 \cong 7$
$H = 4{,}9/0{,}9714 = 5{,}044 \cong 5$
$N = 0{,}9714/0{,}9714 = 1$

La fórmula será: C_7H_5N (17-1)

Como prueba, recalculamos el peso molecular:
P.M = 7x12+5+14 = 103

EJERCICIO Nº 18 (8)

Se desea comerciar con oxígeno en pequeños cilindros que contengan 0,5 ft^3 y que c/u contenga1,0 libras de oxígeno.

Si los cilindros han de estar sometidos como máximo a una temperatura de 120°F:

PREGUNTAS

1. calcular la presión, en libras por pulgada cuadrada (psi), para la que deben estar proyectados; supuesta la aplicación de los gases ideales.

SOLUCION

1.
La Ley de los Gases Ideales se expresa de la manera siguiente:

$$PV = nRT \qquad (2)$$

Donde:
P = presión
V = volumen
n = número de moles
T = temperatura absoluta
R = constante universal

Por comodidad, vamos a utilizar unidades familiares, de manera que R = lts·atm/mol·K; después haremos la conversión a la escala inglesa. Así:

$1\ ft^3 = 28{,}316$ lts ∴
$V = 0{,}5\ ft^3 = 14{,}158$ lts
$°C = 5/9(°F-32) \qquad (3)$
Temperatura en °C = 5/9(120-32) 48,9
T = 48,9+273 = 321,9K

Para calcular el # de moles, usamos:
$$n = W/M \qquad (4)$$

donde
W = peso
M = peso molecular

1 libra = 453,6 gramos ∴
W = 453,6 g
n = 453,6/32 = 14,175 gramos-mol

Utilizando (2):
P = nRT/V = 14,175x0,082x321,9/14,158 = 26,43 atm
1 atm = 14,70 psi ∴
P = 26,43x14,7 = 388,52 psi

Presión de proyección del cilindro = 388,52 psi (18-1)

EJERCICIO N° 19 (8)

PREGUNTAS

1. Calcular el número de pies cúbicos de sulfuro de hidrógeno, medidos a la temperatura de 50°C y a una presión de 29,5 pulgadas de mercurio, que pueden producirse de 7 libras de FeS.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Fe=56; S=32; H=1

Pesos moleculares:

FeS = 56+32 = 88

1 mol de gas expresada el libras, ocupa 359 ft^3 a C.N

La reacción que tiene lugar es la siguiente:

$$FeS + H_2 = Fe + H_2S$$

De acuerdo a la estequiometría de la reacción, la cantidad de H_2S producido a condiciones normales es:

$$H_2S = 7 \cdot (359/88) = 28{,}56\ ft^3$$

Este volumen debemos llevarlo a las condiciones dadas, de conformidad con la ecuación (1); tomando en cuenta que el estado (1) representa las condiciones normales, y el estado (2) las condiciones reales.

$V_1 = 28{,}56\ ft^3$; $V_2 = ?$

$P_1 = 29{,}92$ in-Hg; $P_2 = 29{,}5$ in-Hg

$T_1 = 273K$; $T_2 = 50+273 = 323K$

$$V_2 = 28{,}56 \cdot (29{,}92/29{,}5) \cdot (323/273) = 34{,}27$$

H_2S producido = 34,27 ft^3 (19-1)

EJERCICIO N° 20 (8)

El gas acetileno, se obtiene tratando el carburo de calcio con agua; según la siguiente reacción:

$$CaC_2 + 2H_2O = C_2H_2 + Ca(OH)_2$$

PREGUNTAS

1. Calcular el número de horas de servicio que se pueden conseguir con una libra de carburo, en una lámpara de acetileno que quema 2 pies cúbicos de gas por hora a una temperatura de 75°F y 743 mm-Hg de presión.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Ca=40; C=12; O=16; H=1

Pesos moleculares:

$CaC_2 = 40+2x12 = 64$

$C_2H_2 = 12x2+2 = 26$

Primero determinamos el acetileno producido por una libra de carburo aC.N:

$C_2H_2(C.N) = 1 \cdot (359/64) = 5{,}61\ ft^3$

Este volumen lo llevamos a las condiciones reales por medio de (1):

$V_1 = 5{,}61\ ft^3$; $V_2 = ?$

$P_1 = 760$ mm; $P_2 = 743$ mm

$T_1 = 460+32 = 492°R$; $T_2 = 460+75 = 535°R$

El cero de la escala Farenheit(8), corresponde a 459,69° de la escala Rankine que es una escala absoluta.

$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) \therefore$

$V_2 = 5{,}61 \cdot (761/492) \cdot (535/743) = 6{,}24\ ft^3$

Dado que se queman 2 ft^3/hr de acetileno, el # de horas será:

$t = 6{,}24\ ft^3 \div 2\ ft^3/hr = 3{,}12$

Tiempo de servicio = 3,12 hr. (20-1)

EJERCICIO Nº 21 (8)

Una mezcla de gases contiene:

$HCl = 0{,}274$ lb-mol
$N_2 = 0{,}337$ "
$O_2 = 0{,}089$ "

PREGUNTAS

Calcular: a 40 psi y 30°C:

1. El volumen ocupado por esta mezcla.
2. La densidad en lbs/ft^3.

SOLUCION

1.

Pesos moleculares:

$HCl = 36{,}5$
$N_2 = 28$
$O_2 = 32$

A C.N, 1 lb-mol de gas ocupa 359 ft^3, así, el volumen de la mezcla de gas será:

$V(C.N) = (0{,}274+0{,}337+0{,}089)x359 = 251{,}3\ ft^3$

Cambio de condiciones con ayuda de (1):

$V_1 = 251{,}3\ ft^3$; V_2 =?
$P_1 = 14{,}7$ psi ; $P_2 = 40$ psi
$T_1 = 273K$; $T_2 = 273+30 = 303K$
$V_2 = 251{,}3x14{,}7x303/273x40 = 102{,}5$

Volumen ocupado por la mezcla a condiciones dadas = 102,5 ft^3 (21-1)

2

Para determinar la densidad, con ayuda de (4) debemos calcular el peso de c/u de los gases que forman la mezcla, encontrar el peso total de la mezcla y dividirlo por el volumen total:

Peso de $HCl = 0{,}274x36{,}5 = 10{,}001$ lbs
Peso de $N_2 = 0{,}337x28 = 9{,}436$ lbs
Peso de $O_2 = 0{,}089x32 = 2{,}848$ lbs
Peso total de la mezcla = 22,285 Lbs

Densidad del gas = 22,285/102,5 = 0,2174 lbs/ft^3

Densidad de la mezcla gaseosa = 0,2174 lbs/ft^3. (21-2)

EJERCICIO Nº 22 (8)

Un gas de chimenea tiene la siguiente composición, en volumen:

$CO_2 = 9{,}5\%$
$CO = 0{,}2\%$
$O_2 = 9{,}6\%$
$N_2 = 80{,}7\%$

PREGUNTAS

Utilizando la ecuación de los gases ideales, calcular:

1. La composición del gas, en peso.
2. El volumen ocupado por una libra de gas a 80°F y 29,5 in,Hg de presión.
3. Densidad del gas en lbs/ft^3, en las condiciones del punto (2)
4. Peso específico relativo de la mezcla.

SOLUCION

1.

Pesos moleculares:

$CO_2 = 44$
$CO = 28$
$O_2 = 32$
$N_2 = 28$

Asumiendo un volumen cualquiera, debemos calcular el peso de c/u de las especies cue componen el gas de chimenea; recordando que en C.N, el volumen de una mol de gas expresada en libras, ocupa 359 ft^3.

Asumimos 100 ft^3 de gas:

Cálculo de los volúmenes de las especies:

$CO_2 = 100x0{,}095 = 9{,}5\ ft^3$
$CO = 100x\ 0{,}002 = 0{,}2\ ft^3$
$O_2 = 100x0{,}096 = 9{,}6\ ft^3$
$N_2 = 100x0{,}807 = 80{,}7\ ft^3$

Cálculo de los pesos de las especies:

$CO_2 = 9{,}5x44/359 = 1{,}1634\ lbs = 13{,}98\%$
$CO = 0{,}2x28/359 = 0{,}0156\ lbs = 0{,}19\%$
$O_2 = 9{,}6x32/359 = 0{,}8557\ lbs = 10{,}27\%$
$N_2 = 80{,}7x28/359 = \underline{6{,}2942\ lbs} = 75{,}56\%$
Peso total del gas = 8,3298 lbs

Composición del gas en peso:

$CO_2 = 13{,}98\%$
$CO = 0{,}19\%$
$O_2 = 10{,}27\%$
$N_2 = \underline{75{,}56\%}$
100,00% (22-1)

2.

Asumimos 1 libra de gas, a C.N, y calculamos en volumen que ocupa cada especie, ccn la condición de que la sumatoria es el volumen total del gas:

Volumen ocupado por el

$CO_2 = 1x0{,}1398\cdot(359/44) = 1{,}1406\ ft^3$
$CO = 1x0{,}0019\cdot(359/28) = 0{,}0244\ ft^3$
$O_2 = 1x0{,}1027\cdot(359/32) = 1{,}1522\ ft^3$
$N_2 = 1x0{,}7556\cdot(359/28) = \underline{9{,}6879\ ft^3}$
Volumen gas (C.N) $= 12{,}0051\ ft^3$

Cambio de condiciones:

$V_1 = 12{,}0051\ ft^3$; $V_2 = ?$
$P_1 = 29{,}92$ in,Hg; $P_2 = 29{,}5$ in,Hg
$T_1 = 460+32 = 492°R$; $T_2 = 460+80 = 540°R$
$V_2 = 12{,}0051\cdot(29{,}92/492)\cdot(540/29{,}5) = 13{,}364\ ft^3$

V_2(condiciones dadas) = 13,364 ft^3 (22-2)

3.

Densidad = peso/volumen:

Densidad = 1/13,364 = 0,0748

Densidad = 0,0748 lbs/ft^3 (22-3)

4.

El peso específico relativo de un gas, es la relación de su densidad a la del aire, a las mismas condiciones de temperatura y presión:

A condiciones normales, 1 ft^3 de aire peso 0,0867 lbs.

Calculamos 1 ft^3 de aire a las condiciones dadas:

$$V_2(aire) = 1\cdot(29,92/492)\cdot(540/29,5) = 1,1132\ ft^3$$

Densidad del aire a condiciones dadas = 0,0807/1,1132 = 0,0725 lbs/ft^3

Peso específico relativo = 0,0748/0,0725 = 1,0318

Peso específico relativo = 1,0318 (22-4)

EJERCICIO Nº 23 (8)

Por electrólisis de una disolución de salmuera se obtiene en el cátodo una mezcla de gases, que tiene la siguiente composición; en peso:

Cl_2 = 67%
Br_2 = 28%
O_2 = 5%

PREGUNTAS

Utilizando la ecuación de los gases ideales, calcular:

1. La composición del gas en volumen
2. La densidad de la mezcla, gramos/litro, a 25°C y 740 mm,Hg de presión.
3. El peso específico relativo de la mezcla.

SOLUCION

1.

Pesos moleculares:

Cl_2 = 71
Br_2 = 160
O_2 = 32

Dado que la composición inicial viene dada en peso, para transformarla a volumen, debemos asumir un peso cualquiera para el gas total, repartir ese peso en c/u de las especies en base a la composición; y recordando que la mol de gas (g-mol) ocupa 22,4 litros, encontrar en volumen de cada especie y de allí la composición:

Asumimos 10 g. de gas y calculamos el peso de:

Cl_2 = 10x0,67 = 6,7 g.
Br_2 = 10x0,28 = 2,8
O_2 = 10x0,05 = 0,5

Calculamos los volúmenes de

Cl_2 = 6,7·(22,4/71) = 2,1138 lts = 74,02%
Br_2 = 2,8·(22,4/160) = 0,3920 lts = 13,73
O_2 = 0,5·(22,4/32) = 0,3500 lts = 12,25
Total gas = 2,8558 lts = 100,00

Composición del gas en volumen:

Cl_2 = 74,02%
Br_2 = 13,73%
O_2 = 12,25%
100,00% (23-1)

2.

Como la densidad se pide calcularla a las condiciones dadas, es necesario que el volumen recientemente calculado se lleve a esas condiciones, y como ya conocemos el peso del cual proviene, podemos calcular la densidad:

Veamos:

$V_1 = 2{,}8558$ lts, $P_1 = 760$ mm, $T_1 = 2273K$

$V_2 = ?$, $P_2 = 740$ mm, $T_2 = 25+273 = 298K$

De acuerdo a la ley de los gases ideales:

$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2)$

$V_2 = 2{,}8558 \cdot (760/273) \cdot (298/740) = 3{,}2016$ lts

Densidad = peso/volumen ∴

Densidad = 10/3,2016 = 3,123 g/lts

Densidad = 3,123 g/lts (23-2)

3.

El volumen de una mol de aire a condicione dadas será:

$V_2 = 22{,}4 \cdot (760/740) \cdot (298/273) = 25{,}1121$ lts/mol

Una mol de aire pesa 29 g/mol

Densidad del aire a condiciones dadas = 29/25,1121 = 1,1548 g/lts.

Peso específico relativo del gas = densidad del gas/densidad del aire

Peso específico relativo del gas = 3,123/1,1548 = 2,704

Peso específico relativo del gas = 2,704 (23-3)

EJERCICIO N° 24 (8)

PREGUNTAS

1. Una disolución tiene una densidad de 100 grados Twaddell. Calcular su peso específico relativo y su densidad en grados Baumé.

2. Un aceite tiene un peso específico relativo a 60°/60°F de 0,790. Calcular su densidad en grados API y en grados baumé.

SOLUCION

1.

La escala Twaddell expresa:

$°T = 200(G-1{,}0)$ (5)

Donde:

°T = grados Twaddell

G = peso específico relativo

Así:

$G = °T/200 + 1{,}0$ ∴

$G = (100/200) + 1 = 1{,}5$

G = 1,5 (24-1)

La escala Baumé expresa:

$°Bé = (140/G) - 130$ (6)

$°Bé = 145 - (145/G)$ (7)

Donde:

°Bé = densidad en grados Baumé

La expresión (6) se utiliza para líquidos más livianos que el agua y la (7) para los que son más pesados. En este caso, utilizamos la (7):

$°Bé = 145 - (145/1{,}5) = 48{,}33$

°Bé = 48,33 (24-1)

$API = (141{,}5/G) - 131{,}5$ (8)

Donde:

API = grados API

$API = (141{,}5/0{,}79) - 131{,}5 = 47{,}61°$

API = 47,61° (24-2)

Utilizando (6):

$°Bé = (149/0,79) - 130 = 47,22$

°Bé = 47,22 (24-2)

EJERCICIO N° 25 (8)

Una mezcla de amoníaco y aire a la presión de 730 mm,Hg y temperatura de 30°C, contiene 30% de NH_3 en volumen.

El gas pasa a una velocidad de 100 ft^3/min a través de una torre de absorción, en la que solo se extrae NH_3.

Los gases salen de la torre a una presión de 725 mm,Hg; una temperatura de 20°C y contienen 0,05%NH_3 en volumen.

PREGUNTAS

1. Calcular la velocidad de flujo del gas que sale de la torre, en ft^3/min.
2. Calcular el peso de NH_3 absorbido en la torre por minuto.

SOLUCION

1.

Velocidad de flujo al entrar = 100 ft^3/min (30°C, 730 mm)

Entrada de NH_3 = 100x0,3 = 30 ft^3/min

Entrada de aire = 100-30 = 70 ft^3/min

Salida de aire = 100-0,05 = 99,95%

Salida de gas = 70/0,995 = 70,035 ft^3/min (30°C, 730 mm)

Dado que la salida real del gas es a 20°C y 725 mm,Hg; con la ayuda de la ley de los gases ideales, debemos hacer el consiguiente cambio de estado:

$V_1 = 70,035\ ft^3/min$ $\quad V_2 = ?$

$P_1 = 730$ mm,Hg $\quad P_2 = 725$ mm,Hg

$T_1 = 30+273 = 303K$ $\quad T_2 = 20+273 = 293K$

Durante el cambio de condiciones del gas ideal, se cumple:

$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) \therefore$

$V_2 = 70,035 \cdot (730/303) \cdot (293/725) = 68,19$

Velocidad de flujo del gas al salir = 68,19 ft^3/min (25-1)

2.

NH_3 que sale de la torre = 70,035-70 = 0,035 ft^3/min

NH_3 absorbido = 30 – 0,035 = 29,965 ft^3/min

Peso molecular del NH_3 = 14+3 = 17 $\therefore$

NH_3 absorbido = 29,965·(17/359) = 1,419 lbs/min

NH_3 absorbido = 1,419 lbs/min (25-2)

EJERCICIO N° 26 (8)

Un volumen de 1000 ft^3 de aire húmedo, a una presión total de 740 mm,Hg y temperatura de 30°C; contiene vapor de agua en tales proporciones que su presión parcial es de 22 mm,Hg.

Sin cambiar la presión total, la temperatura se reduce a 15°C y parte del vapor de agua se separa por condensación.

Después de enfriarlo se encuentra que la presión parcial del vapor de agua es 12,7 mm,Hg.

PREGUNTAS

1. Calcular el volumen del gas después del enfriamiento.
2. Calcular el peso del agua condensada.

SOLUCION

1.

En este caso, se está expresando la composición de una mezcla gaseosa en función de las presiones parciales de los componentes.

La adición o extracción de un componente de una mezcla, produce un cambio en la presión parcial de todos los otros componentes.

El volumen real ocupado por c/u de los componentes será siempre el mismo que el de toda la mezcla, pues en esto se fundamenta la ley de las presiones parciales de Dalton.

El volumen de la mezcla puede determinarse siempre por aplicación de la ley de los gases a cualquier componente que pasa por el proceso sin cambio en su cantidad, y cuya presión parcia se conoce en las condiciones inicial y final, veamos:

Base = 1000 ft^3 de aire húmedo (740 mm, 30°C)

Presión inicial (aire seco) = 740-22 = 718 mm

Presión final (aire seco) = 740-12,7 = 727,3 mm

Volumen real inicial (aire seco) = 1000 ft^3= volumen de la mezcla.

El volumen final de la mezcla al cambiar las condiciones, puede calcularse aplicando la ley de los gases ideales, solo al aire seco, así:

$V_1 = 1000\ ft^3$ $V_2 = ?$

$P_1 = 718$ mm $P_2 = 727{,}3$ mm

$T_1 303K$ $T_2 = 288K$

$V_2 = 1000 \cdot (718/303) \cdot (288/727{,}3) = 938{,}3\ ft^3$

Volumen de la mezcla después del enfriamiento = 938,3 ft^3 (26-)

2.

Para determinar el peso del agua condensada, debemos llevar acondiciones normales tanto el volumen inicial como el final del agua.

Los volúmenes inicial y final del agua son respectivamente los mismos de la mezcla, por tanto:

$V_1 = 1000\ ft^3$ $V_2 = ?$

$P_1 = 22$ mm $P_2 = 760$ mm

$T_1 = 303K$ $T_2 = 273K$

$V_2(C.N) = 1000 \cdot (22/303) \cdot (273/760) = 26.081\ ft^3$

Para el volumen final de agua:

$V_1 = 938{,}3\ ft^3$ $V_2 = ?$

$P_1 = 12{,}7$ mm $P_2 = 760$ mm

$T_1 = 288K$ $T_2 = 273K$

$V_2(C.N) = 938{,}3 \cdot (12{,}7/288) \cdot (273/760) = 14{,}863\ ft^3$

Agua condensada (C.N) = 26,081-14,863 = 11,218 ft^3

H_2O (condensada) = 11,218·(18/359) = 0,562 lbs

Peso de agua condensada = 0,562 lbs (26-2)

EJERCICIO Nº 27 (8)

En la producción de carbón activado empleado para la absorción, se destilan cáscaras de coco y se tratan con vapor precalentado.

Los gases que resultan del proceso salen mezclados con el vapor de agua.

En una planta que emplea este proceso, el gas producido es 100000ft^3/hr a 850°F y 15 psi de presión absoluta, y presenta el siguiente análisis volumétrico

$N_2 = 10{,}0\%$ $H_2 = 20{,}0\%$

$CO_2 = 5{,}0\%$ $CO = 25{,}0\%$

$H_2O = 15{,}0\%$ $NH_3 = 20{,}0\%$ $C_2H_4 = 5{,}0\%$

Antes de la absorción del NH_3 en H_2SO_4, los gases se enfrían a 150°F en un cambiador de calor. El resultado de esto es la separación de 90% del agua por condensación.

El NH_3 absorbido por el agua es despreciable.

La absorción del NH_3 y la extracción de casi todo el vapor de agua residual, va acompañada por un posterior enfriamiento y absorción de la disolución de ácido sulfúrico.

PREGUNTAS

1. Calcular el peso molecular promedio de la mezcla gaseosa original (incluyendo el vapor de agua).

2. El volumen específico de los gases que salen del proceso a 850°F y 15 psi, expresado en ft^3/lb.

3. El peso de los gases (incluyendo el vapor de agua) que salen del proceso, expresado en libras por hora.

4. El peso del agua condensada en el cambiador de calor, en libras por hora.

5. El volumen de los gases (incluyendo el vapor de agua), que salen del cambiador de calor a 150°F y 15 psi, expresado en ft^3/hr.

6. El peso de $(NH_4)_2SO_4$ producido, en libras por hora.

7. El análisis volumétrico de los gases que salen después de la absorción por H_2SO_4.

SOLUCION

1.

El peso molecular medio de una mezcla de gases se calcula asumiendo un mol de la mezcla, como base de cálculo. Se calcula entonces el peso de esta cantidad molar (8), y esto representa el peso molecular medio.

Hay que recordar la ecuación (4) que sirve para relacionar: el peso (W), el peso molecular (M) y el número de moles (n):

Pesos moleculares:

N_2=28; CO_2=44; H_2O=18; H_2=2; CO=28; NH_3=17; C_2H_4=28

n =W/M (4)

Asumimos 1 lb-mol de gas:

De acuerdo a la composición, al N_2 le corresponderia 1x0,1=0,1 lb-mol, su peso molecular es 28, por tanto, aplicando (4), W = 28x0,1=2,8 lb. De esta manera vamos a calcular el peso de cada componente de la mezcla y la sumatoria de esos pesos será en peso molecular promedio:

N_2 = 0,10 lb-mol = 2,8 lbs
CO_2 = 0,05lb-mol = 2,2 lbs
H_2O = 0,15 lb-mol = 2,7 lbs
H_2 = 0,20 lb-mol = 0,4 lbs
CO. = 0,25 lb-mol = 7,0 lbs
NH_3 = 0,20 lb-mol = 3,4 lbs
C_2H_4= 0,05 lb-mol = 1,4 lbs
Peso de 1 lb-mol = 19,9 lbs

Peso molecular medio del gas = 19,9 (27-1)

2.

En C.N, el peso molecular medio expresado en libra, ocupa 359 ft^3. Veamos estos 359 ft^3 que volumen representan a las condiciones de salida del gas, para lo cual utilizaremos la ley de los gases ideales:

V_1 = 359 ft^3 V_2 =?
P_1 = 14,70 psi P_2 = 15 psi
T_2 = 492°R T_2 = 460+850 = 1310°R

V_2 = 359·(14,7/15)·(1310/492) = 936,76 ft^3
Volumen específico = 936,76/19,9 = 47,07 ft^3/lb

Volumen específico del gas al salir = 47,07 ft^3/lb (27-2)

3.

Levamos el gas producido a C.N:

V(C.N) = 100000·(15/1310) · (492/14,7) = 38323,73 ft^3/hr
H_2O en este = 38323,73x0,15 = 5748,6 ft^3/hr
H_2O condensada = 5748,6x0,9 = 5173,7 ft^3/hr
Peso del gas producido = 38323,73(ft^3/hr)x19,9lb/359ft^3 = 2124,4 lb/hr
Peso H_2O condensada = 5173,7·(18/359) = 259,4 lb/hr
Gases que salen = 2124,4 – 259,4 = 1865 lb/hr

Peso del gas al salir = 1865 lb/hr (27-3)

4.

Agua condensada = 259,4 lb/hr (ya determinado)

Peso agua condensada = 259,4 lb/hr (27-4)

5.

Aplicamos la ley de los gases ideales:

$V_1 = 38323,73\ ft^3/hr$ $V_2 = ?$

$P_1 = 14,7\ psi$ $P_2 = 15\ psi$

$T_1 = 32+460 = 492°R$ $T_2 = 150+460 = 610°R$

$V_2 = 38323,73 \cdot (14,7/15) \cdot (610/492) = 46564,9$

Volumen gases con agua remanente = 46565 ft^3/hr (27-5)

6.

La reacción que produce el $(NH_4)_2 \cdot SO_4$, se escribe así:

$$2NH_3 + H_2SO_4 = (NH_4)_2 \cdot SO_4$$

Pesos moleculares:

$NH_3 = 17$

$(NH_4)_2 \cdot SO_4 = 132$

Volumen NH_3(C.N) = 38323,73x0,20 = 7664,75 ft^3/hr

Peso NH_3 = 7664,75·(17/359) = 363 lb/hr

$(NH_4)_2 \cdot SO_4$ = 363·(132/2x17) = 1409,3 lb/hr

$(NH_4)_2 \cdot SO_4$ producido = 1409,3 lb/hr (27-6)

7.

Si eliminamos de los gases en NH_3 y el H_2O al final del proceso, la composición (en volumen) del gas al salir será:

N_2	=	100000x0,10 = 10000 ft^3/hr	=	**15,39%**	
CO_2	=	100000x0,05 = 5000 "	=	**7,69%**	
H_2	=	100000x0,20 = 20000 "	=	**30,77%**	
CO	=	100000x0,25 = 25000 "	=	**38,46%**	
C_2H_4	=	100000x0,05 = 5000 "	=	**7,69%**	
		65000 ft^3/hr		**100,0**	(27-7)

EJERCICIO N° 28 (9)

El análisis Orsat de un gas da los siguientes porcentajes en volumen

$N_2 = 75\%$

$CO_2 = 15\%$

$O_2 = 10\%$

El punto de rocío del gas es 30°C, medido cuando la presión total del gas es de 745 mm,Hg.

PREGUNTAS

1. El análisis completo del gas, los porcentajes en volumen sobre una base de en húmedo.
2. El análisis completo del gas, en porcentaje en peso, sobre una base de en húmedo.
3. La densidad del gas a C.N, en lb/ft^3.
4. La densidad del gas a 500°F y 745 mm de presión.

SOLUCION

1.

El aparato Orsat, siempre está saturado con vapor de agua (9).

La presión de agua en el punto de rocío (30°C) = 31,82 mm (tablas).

Supongamos 100 cm^3 de aire seco.

P(aire seco) = 745-31,82

V(agua) = {(31,82)÷(745-31,82)}x100 = 4,46 cm^3
La composición del gas húmedo será:

N_2 = 100x0,75 = 75,0 cm^3 = **71,80%**
CO_2 = 100x0,15 = 15,0 cm^3 = **14,36%**
O_2 = 100x0,10 = 10,0 cm^3 = **9,57%**
H_2O = 4,46cm^3 = **4,27%**
104,46 **100,0** (28-1)

2.

Dado que ya tenemos la composición del gas en volumen, sabiendo que a C.N una mol de cualquier gas expresada en gramos ocupa 22,4 litros, podemos entonces calcular los pesos de los componentes y su composición en peso:

Supongamos 100 lts de gas aC.N:

Los respectivos pesos y la composición serán los siguientes;

N_2 = 100x0,7180x(28/22,4) = 89,75 g = **66,45%**
CO_2 = 100x0,1436x(44/22,4) = 28,21 g = **20,89%**
O_2 = 100x0,0957x(32/22,4) = 13,67 g = **10,12%**
H_2O = 100x0,0427x(18/22,4 = 3,43 g = **2,54%**
135,06 g **100,0%** (28-2)

3.

Supongamos 1 ft^3 de gas húmedo. El peso de c/u de los componentes será:

N_2 = 0,7180x(28/359) = 0,0560 lb
CO_2 = 0,1436x(44/359) = 0,0716
O_2 = 0,0957x(32/359) = 0,0085
H_2O = 0,0427x(18/359) = 0,0021 lb
Peso de 1 ft^3 de gas 0,1382 lb
Densidad del gas = 0,1382lb/1 ft^3 = 0,1382 lb/ft^3
Densidad del gas = 0,1382 lb/ft^3 (28-3)

4.

Recordemos que °C = 5/9(°F-32) ∴ 500°F = 260°C

Vamos a trabajar con un volumen conocido que es el de una mol de gas = 359 ft^3 a C.N y vamos a llevar este volumen a las condiciones reales:

T_1 = 273K T_2 = 260+273 = 533K
P_1 = 760 mm P_2 = 745 mm
V_1 = 359 ft^3 V_2 =?

V_2 = 359x(760/273)x(533/745) = 715 ft^3

Este es el volumen ocupado por una mol de gas a condiciones reales. La composición volumétrica no cambia.

Asumamos 1 ft^3 de gas a condiciones reales y a través de sus componentes, calculemos cuanto pesa:

N_2 = 0,7180x(28/715) = 0,0281 lb
CO_2 = 0,1436x(44/715) = 0,0088
O_2 = 0,0957x(32/715) = 0,0043
H_2O = 0,0427x(18/715) = 0,0011
Peso de 1 ft^3 real 0,0423 lb

Densidad del gas = 0,0423 lb/1 ft^3 = 0,0423 lb/ft^3
Densidad del gas a condiciones dadas = 0,0423 lb/ft^3 (28-4)

EJERCICIO Nº 29 (8)

Un subproducto de un horno de coque proporciona un millón de pies cúbicos de gas de hulla por hora, que tiene la siguiente composición, en volumen:

C_6H_6 = 5,0% CO = 7,0% N_2 = 3,0%
C_7H_8 = 5,0% H_2 = 35,0%
CH_4 = 40,0% CO_2 = 5,0%

El gas sale del horno a 20,0 psi de presión absoluta y 740°F.

Después de enfriarse a 100°F, el benceno y el tolueno se separan completamente por absorción.

PREGUNTAS

1. Calcular el peso molecular medio del gas que sale del horno y del recipiente de absorción.
2. El peso del gas que sale del horno y del recipiente de absorción.
3. La composición volumétrica del gas que sale del recipiente de absorción.
4. Los pesos del benceno y del tolueno absorbidos,

SOLUCION

1.

Pesos moleculares:

C_6H_6 = 78 C_7H_8 = 91 CH_4 = 16
CO = 28 H_2 = 2 CO_2 = 44 N_2 = 28

Tomemos como base 1 lb-mol de gas y vemos cuanto pesa y ese será su peso molecular. Si distribuimos esta lb-mol entre los componentes y multiplicamos por el peso molecular de c/u de e los, encontraremos el peso con que este componente contribuye al peso molecular de la mezcla: por ejemplo, al C_6H_6 le corresponden 1x0,05 = 0,05 lb-mol; si multiplicamos esto por su peso molecular (78), nos dará 3,9 lb y con este valor contribuye este compuesto al peso molecular total:

C_6H_6 = 0,05x78 = 3,9 lb
C_7H_8 = 0,05x91 = 4,6 "
CH_4 = 0,40x16 = 6,4 "
CO = 0,07x28 = 1,96
H_2 = 0,35x2 = 0,7 "
CO_2 = 0,05x44 = 2,2 "
N_2 = 0,03x28 = 0,84 "
20,60 lb

Peso molecular medio = 20,60 (29-1)

Al salir del recipiente de absorción se separan del gas el benceno y el tolueno. El nuevo gas sería:

CH_4 = 40 = 44,44%
CO = 7 = 7,78
H_2 = 35 = 38,89
CO_2 = 5 = 5,56
N_2 = 3 = 3,33 %
90 100,0%

Una libra-mol de este nuevo gas, pesará:

CH_4 = 0,4444x16 = 7,1104 lb
CO = 0,0778x28 = 2,1784
H_2 = 0,3889x2 = 0,7778
CO_2 = 0,0556x44 = 2,4464
N_2 = 0,0333x28 = 0,9324 lb
13,4454 lb

El peso molecular medio = 13,4454 (29-1)

2.

Trasladamos el gas de las condiciones dadas a las condiciones normales:

V_1 = 1'000.000 ft^3 V_2 = ?
P_1 = 20 psi P_2 = 14,7 psi
T_1 = 460+740 = 1200°R T_2 = 492°R
V_2(C.N) = 1'000.000·(20/14,7) · (492/1200) = 557823 ft^3

Dado que el peso molecular promedio ya fue determinado = 20,6:

Peso de este gas = 557823x(20,6/359) = 32009 lb/hr.

El gas que sale del horno pesa = 32009 lb/hr (29-2)

El gas que sale del recipiente de absorción es = 1'000.000x0,9 = 900000 ft^3/hr.

$V_2(C.N) = 900000x(20/14,7)x(492/1200) = 502041\ ft^3/hr$

Peso de este gas = 502014x(13,4454/359) = 18802,6

Gas que sale del recipiente de absorción = 18802,6 lb/hr (29-2)

3.

Esta composición ya fue calculada en el punto (1.) como:

CH_4 = 44,44%
CO = 7,78%
H_2 = 38,89% (29-3)
CO_2 = 5,56%
N_2 = 3,33%

4.

Benceno absorbido = 1'000.000x0,05 = 50000 ft^3/hr
Tolueno " = 1'000.000x0,05 = 50000 ft^3/hr

Levamos estos gases a condiciones normales:

$C_7H_8 = C_6H_6 = 50000x(20/14,7)x(492/1200) = 27891\ ft^3/hr$ (C.N)

Pesos:

$C_6H_6 = 27891x(78/359) = 6060$
$C_7H_8 = 27891x(92/359) = 7147,6$

Pesos:

C_6H_6 = 6060 lb/hr (29-4)
C_7H_8 = 7147,6 lb/hr (29-4)

EJERCICIO N° 30 (8)

El gas que sale de un estabilizador de gasolina, tiene la siguiente composición en volumen:

C_3H_8 .... 8,0%
CH_4 78,0
C_2H_6........... 10,0
C_4H_{10}.......... 4,0

Este gas sale a 90°F y 16 psi de presión absoluta, se suministra a la velocidad de 70000 ft^3/hr a una planta de conversión de gas; donde tienen lugar las siguientes reacciones:

(1) $C_nH_{2n+2} + nH_2O = nCO + (2n+1)H_2$
(2) $CO + H_2O = CO_2 + H_2$

Los gases C_nH_{2n+2} se convierten en un 95% y el 90% del CO resultante también reacciona según las reacciones anteriores.

PREGUNTAS

1. Calcular el peso molecular medio del gas que sale del estabilizador.
2. Calcular el peso del gas suministrado a la planta de conversión, en libras por hora.
3. Calcular el peso del hidrógeno que sale de la planta convertidora, en libras/hora.

SOLUCION

1.

Asumimos 1 lb-mol de gas y determinamos cuanto pesa esta y ese será el peso molecular medio del gas:

C_3H_8 = 0,08x44 = 3,52 lb
CH_4 = 0,78x16 = 12,48 lb
C_2H_6 = 0,10x30 = 3,0 lb
C_4H_{10} = 0,04x58 = 2,32 lb
21,32 lb

Peso molecular medio = 21,32 (30-1)

2.
Llevamos el gas a condiciones normales para averiguar su peso, así:

$V_1 = 70000\ ft^3/hr$ $V_2 = ?$
$P_1 = 16\ psi$ $P_2 = 14,7\ psi$
$T_1 = 90+460 = 550°R$ $T_2 = 402°R$
$V_2 = 70000x(16/14,7)x(492/550) = 68156\ ft^3/hr$
Peso del gas = 68156x(21,32/359) = 4047,6

Gas suministrado a planta de conversión = 4047,6 lb/hr (30-2)

3.
Todos los gases corresponden a la fómula C_nH_{2n+2}, de modo que se convierten en un 95% de acuerdo a la reacción (1). Para calcular el peso de H_2 debemos hacerlo a C.N:

Cuando n = 3:
$C_3H_8 + 3H_2O = 3CO + 7H_2$
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$
Gas convertido = $68156x0,95 = 64748,2\ ft^3/hr$
$H_2 = 7C_3H_8 = 7x64748,2x0,08 = 36259\ ft^3/hr$
$CO = 3C_3H_8 = 3x64748x0,08 = 15540\ ft^3/hr$
H_2 del CO = $0,9x15540 = 13986\ ft^3/hr$
$H_2(C_3H_8) = 36259+13986 = 50986\ ft^3/hr$

Cuando n = 1:
$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$
$H_2 = 3CH_4 = 64748,2x0,78x3 = 151511\ ft^3/hr$
H_2 del CO = 64748,2x0,78x0,9 = 45453 "
$H_2(CH_4) = 151511 + 45453 = 196964\ ft^3/hr$

Cuando n = 2:
$C_2H_6 + 2H_2O = 2CO_2 + 5H_2$
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$
$H_2 = 5C_2H_6 = 5x64748,2x0,1 = 32374,1\ ft^3/hr$
H_2 del CO = 2x64748,2xo,1x0,9 = 11655 "
$H_2(C_2H_6) = 32374+11655 = 44029\ ft^3/hr$

Cuando n = 4:
$C_4H_{10} + 4H_2O = 4CO + 9H_2$
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$
$H_2 = 9C_4H_{10} = 9x67748,2x0,04 = 23309\ ft^3/hr$
H_2 del CO = 4x64748,2x0,04x0,9 = 9324 "
$H_2(C_4H_{10}) = 32633\ ft^3/hr$
Total H_2 producido = $50245+44029+196964+32633 = 323871\ ft^3/hr$
H producido = 323871x(2/359) = 1804,3 lb/hr

Hidrógeno producido = 1804,3 lb/hr (30-3)

EJERCICIO Nº 31 (8)

En la fabricación de sosa por el proceso LeBlanc, se calienta sulfato sódico con cartón y carbonato sódico.

La pasta resultante tiene la siguiente composición:

Na_2CO_3	42%
Otras sustancias insolubles en agua	6%
Materia insolubles (carbón,CaS, etc.)	52%

La pasta se trata con agua para extraer el carbonato sódico. El residuo sólido de este tratamiento, tiene la siguiente composición:

Na_2CO_3	4,0%
Otras sustancias insolubles en agua	0,5%
Materia insoluble	85,0%
Agua	10,5%

PREGUNTAS

1. Calcular el peso del residuo que queda del tratamiento de 1,0 tonelada de pasta.
2. Calcular el peso del carbonato sódico extraído, por tonelada de pasta.

SOLUCION

1.

Base = 1 tonelada de pasta = 2000 lb de pasta

Llamemos W = peso del residuo:

Peso de materia insoluble en pasta = Peso de materia insoluble en residuo ∴

2000x0,52 = 0,85W

W = 2000x0,52/0,85 = 1223,53

Peso del residuo = 1223,53 lb (31-1)

2.

Na_2CO_3 (extraído) = Na_2CO_3 (cargado) – Na_2CO_3 (residuo)

Na_2CO_3 (cargado) = 2000x0,42 = 840 lb

Na_2CO_3 (residuo) = 1223,53x0,04 = 48,94 lb

Na_2CO_3 (extraído) = 840-48,94 = 791,06

Na_2CO_3 (extraído) = 791,06 lb (31-2)

EJERCICIO N° 32 (8)

El fósforo se prepara, calentando en un horno eléctrico una masa perfectamente mezclada de fosfato de calcio, arena y carbón.

Puede suponerse que en una cierta carga existen las condiciones siguientes:

- La cantidad de sílice empleada está en un 10% de exceso de la que teóricamente se necesita para combinarse con el calcio, a fin de formar silicato.
- El carbón se encuentra en un 40% de exceso respecto al necesario para combinarse como CO con el oxígeno que llevaría todo el fósforo como pentóxido.

PREGUNTAS

1. Calcular là composición (%) de la carga inicial.
2. Calcular las libras de fósforo obtenidas, a partir de 100 libras de carga; suponiendo que la descomposición del fósforo par la SiO_2 es del 90% y que la reducción del P_2O_5 liberado por el carbón, se completa en un 70%.

SOLUCION

1.

Reacciones:

(1) $Ca_3(PO_4)_2 + 3SiO_2 = P_2O_5 + 3CaO{\cdot}SiO_2$

(2) $P_2O_5 + 5C = 2P + 5CO$

Pesos atómicos:

P=31; Ca=40; O=16; Si=28; C=12

Pesos moleculares:

$Ca_3(PO_4)_2 = 310$

$SiO_2 = 60$

$P_2O_5 = 142$

Asumimos 100 libras de $Ca_3(PO_4)_2$:

En (1):

$SiO_2 = 100 \cdot (3x60/310) = 58{,}06$ lb

Dado que hay un 10% de SiO_2 en exceso:

SiO_2(total) = 58,08x1,1 = 63,87 lb

P_2O_5 formado = 100 · (142/310) = 45,81 lb

En (2):

$$C = 45,81 \cdot (5x12/142) = 19,35 \text{ lb}$$

Dado que jay un 40% de C en exceso:

$$C(total) = 19,35x1,4 = 27,10 \text{ lb}$$

La composición de la carga inicial sería (32-1):

$Ca_3(PO_4)_2$	100,00 lb	52,26%
Arena(SiO_2)	63,87	33,45%
Carbón(C)	27,10	14,19 .
	190,97 lb	100,00

2.

Para 100 libras de carga:

$Ca_3(PO_4)_2 = 100x0,5236 = 52,36$ lb
$SiO_2 = 100x0,3345 = 33,45$
$C = 100x0,1419 = 14,19$

$Ca_3(PO_4)_2$ descompuesto $= 52,36x0,9 = 47,124$ lb
P_2O_5 formado $= 47,124 \cdot (142/310) = 21,59$ lb
P (producido) $= 21,59 \cdot (2x31/142)x0,7 = 6,597$ lb

Fósforo producido = 6,6 lb (32-2)

EJERCICIO Nº 33 (8)

Puede prepararse el CO_2 puro, tratando piedra caliza con ácido sulfúrico.

La piedra caliza empleada en tal proceso contenía $CaCO_3$ y $MgCO_3$, siendo lo restante materia inerte insoluble.

El ácido empleado contenía un 12% de H_2SO_4 en peso, el residuo del proceso tenía la siguiente composición:

$CaSO_4$	8,56%
$MgSO_4$	5,23
H_2SO_4	1,05
Inertes	0,53
CO_2	0,12
H_2O	84,51

Durante el proceso, se calentó la masa y se desprendieron el CO_2 y el vapor de agua.

PREGUNTAS

1. Calcular el análisis de la caliza empleada.
2. Calcular el porcentaje del exceso del ácido empleado.
3. Calcular el peso y el análisis de la materia destilada de la masa de reacción, por 1000 libras de caliza tratada.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Ca=14; Mg=24; C=12; O=16; S=32

Pesos moleculares:

$CaSO_4 = 136$
$MgSO_4 = 120$
$CaCO_3 = 100$
$MgCO_3 = 84$

Supongamos 100 lb de residuo:

Inertes $= 100x0,0053 = 0,53$ lb
$CaSO_4 = 100x0,0856 = 8,56$ lb
$MgSO_4 = 100x0,0523 = 5,23$ lb

Ca en $CaSO_4$ = 8,56·(40/136) = 2,52 lb
Mg en $MgSO_4$ = 5,23·(24/120) = 1,05 lb.

Análisis de la piedra caliza (33-1)

$CaCO_3$ = 2,52·(100/40) =	6,30 lb =	59,94%
$MgCO_3$ = 1,05·(84/24) =	3,68 =	35,02
Inertes =	0,53	5,04
	10,51 lb	100,00%

2.
Pesos moleculares:
H_2SO_4 = 98
$SO^{=}$ = 96

SO_4 en ($CaSO_4$) = 8,56-2,52 = 6,04 lb
SO_4 en ($MgSO_4$) = 5,23-1,05 = 4,18 lb
H_2SO_4 en estos = (6,04+4,18) · (98/96) = 10,43 lb

El H_2SO_4 reaccionó para formar estos dos compuestos, de modo que el que se encuentra en el residuo, es el exceso:

H_2SO_4 exceso = 1,05/10,43 = 10,07%

Exceso de ácido = 10,07% (33-2)

3.

Reacciones:

$$(1)\quad CaCO_3 + H_2SO_4 = CaSO_4 + CO_2 + H_2O$$
$$(2)\quad MgCO_3 + H_2SO_4 = MgSO_4 + CO_2 + H_2O$$

En 1000 libras de piedra caliza:
Inertes en caliza = Inertes en residuo
1000x0,0504 = 0,0053xResiduo
Residuo = (1000x0,0504)/0,0053 = 9509,43 lb
CO_2 en este = 9509,43x0,0012 = 11,41 lb
CO_2 en $CaCO_3$ = 1000x0,5994·(44/100) = 263,74 lb
CO_2 en $MgCO_3$ = 1000x0,3502·(44/84) = 183,44 lb
CO_2 destilado = 263,74+183,44-11,41 = 435,77 lb

De las reacciones (1) y (2):
H_2O (vapor) = 1000x0,5994·(18/100) + 1000x0,3502·(18/84) = 182,93 lb

Destilado (33-3):

CO_2 =	435,77 lb =	70,43%
H_2O =	182,93 lb =	29,57%
	618,70 lb	100,00%

EJERCICIO Nº 34 (8)

El carbonato bárico ($BaCO_3$) es de importancia comercial como materia prima para la obtención de otros compuestos de bario. En su preparación, primero se obtiene BaS calentando el sulfuro natural, baritas ($BaSO_4$), con carbón.

El BaS se extrae de esta masa con agua y la disolución se trata con carbonato sódico (Na_2CO_3), para precipitar el carbonato bárico.

En la operación de tal proceso se encontró que la disolución de BaS formada contenía también algo de CaS, procedente de las impurezas de la barita.

La disolución se trató con Na_2CO_3, y la masa precipitada de carbonatos de Ca y Ba se separó por filtración.

Se encontró que por cada 100 libras de filtrado recogido, se obtuvieron 16,45 libras de precipitado seco.

El análisis del precipitado es:

$CaCO_3$	9,9%
$BaCO_3$	90,1%

El análisis del filtrado fue:

Na_2S	6,85%
Na_2CO_3	2,25%
H_2O	90,90%

El Na_2CO_3 para la precipitación se añadió en forma de sosa anhidra que contenía $CaCO_3$ como impureza.

PREGUNTAS

1. Determinar el porcentaje de Na_2CO_3 empleado en exceso del requerido, para precipitar el BaS y el CaS.

2. Determinar la composición de la disolución inicial de sulfuros de Ba y Ca (Nota: El BaS se encuentra en realidad descompuesto en disolución, existiendo el compuesto $OH{\cdot}BaSH{\cdot}5H_2O$. Sin embargo, en esta reacción el cálculo total puede realizarse, y la composición se expresa como si el compuesto en disolución fuese BaS).

3. Calcular la composición de la sosa seca empleada en la precipitación.

SOLUCION

1

Pesos atómicos:

Na=23; Ba=137,4

Pesos moleculares:

$Na_2S = 78$

$Na_2CO_3 = 106$

Reacciones:

(1) $BaSO_4 + 2C = BaS + 2CO_2$

(2) $BaS + Na_2CO_3 = BaCO_3\downarrow + Na_2S$

(3) $CaS + Na_2CO_3 = CaCO_3\downarrow + Na_2S$

$Na_2S = 100x0,0685 = 6,85$ lb

Na de este = 6,85·(2x23/78) = 4,04 lb

Na_2CO_3 de reacciones = 4,04·(106/2x23) = 9,31 lb

Na_2CO_3 exceso = 2,25 lb (exceso debido a que no reaccinó)

Na_2CO_3 exceso = 100·(2,25/9,31) = 24,17%

Na_2CO_3 exceso = 24,17% (34-1)

2.

Pesos moleculares:

BaS = 169,4

$BaCO_3 = 197,4$

CaS = 72

$BaCO_3 = 16,45x0,901 = 14,82$ lb

$CaCO_3 = 16,45 - 14,82 = 1,63$ lb

Reacción (2):

BaS = 14,82·(169,4/197,4) = 12,72 lb

Na_2CO_3 de este BaS = 14,82·(106/187,4) = 7,96 lb

Reacción (3):

Na_2CO_3 para CaS = 9,31 – 7,96 lb

CaS = 1,35·(72/106) = 0,92 lb

Disolución inicial (34-2)

H_2O =	100x0,909 = 90,90 lb =	86,95%
BaS =	12,72 lb =	12,17%
CaS =	0,92 lb =	0,88%
	104,54 lb	100,00%

3.

Na_2CO_3 total = 9,31+2,25 = 11,56 lb
$CaCO_3$ del CaS = 0,92·(100/72) = 1,28 lb
$CaCO_3$ de la sosa = 16,45x0,099 – 1,28 = 0,35 lb
Sosa seca (34-3)

Na_2CO_3 =	11,56 lb =	97,06%
$CaCO_3$ =	0,35 lb =	2,94%
	11,91 lb	100,00%

EJERCICIO Nº 35 (8)

Un vidrio para la obtención de productos químicos está compuesto por silicatos y boratos de diversos metales básicos. Su composición es la siguiente:

SiO_2 = 66,2%
B_2O_3 = 8,2
Al_2O_3 = 1,1
ZnO = 10,3
MgO = 6,0
Na_2O = 8,2

PREGUNTAS

1. Determinar si en este vidrio se encuentran en exceso los constituyentes ácidos o básicos, y el porcentaje de exceso de poder reactivo por encima del teóricamente requerido para un vidrio neutro. (Supóngase que el Al_2O_3 actúa como base y que el B_2O_3 como ácido, HBO_2).

SOLUCION

1.

En términos del MgO, determinamos el equivalente básico de todos los compuestos básicos, y en términos del SiO_2 los equivalentes ácidos y los comparamos estequiometricamente.

Pesos moleculares:

SiO_2 = 60
B_2O_3 = 70
Al_2O_3 = 102
ZnO = 81,4
MgO = 40,3
Na_2O = 62

Compuestos básicos	Compuestos ácidos
Al_2O_3	SiO_2
ZnO	B_2O_3
MgO	
Na_2O	

El equivalente de un compuesto A en otro B, consiste en determinar una mol del primero a cuantas moles del segundo equivale, en peso:

MgO equivalente = 6,0+1,1·(40,3/102)+10,3·(40,3/81,4)+8,2·(40,3/62) = 16,86%
SiO_2 equivalente = 66,2+8,2·(60/70) = 73,23%
Vidrio nuetro = $MgO·SiO_2$
SiO_2 requerido = 16,86·(60/40,3) = 25,10%.
Hay un exceso de ácido (35-1).
Acido en exceso = 73,23-25,10 = 48,13%
Acido en exceso = 48,13% (35-1)

EJERCICIO Nº 36 (8)

Un agua contiene los siguientes metales expresados en miligramo por litro: Ca=32; Mg=8,4; Fe(ferroso)=0,5.

PREGUNTAS

1. Calcular la dureza total del agua, expresada en mg. De $CaCO_3$ equivalentes, el Ca del cual tendría el mismo poder reactivo que el poder reactivo total de los metales presentes.

2. Suponiendo que estos metales están todos combinados como bicarbonatos, calcú ese el precio de la cal necesaria para ablandar 1000 galones de agua. La cal comercial que tiene un 90%CaO cuesta $8,50 por tonelada.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Ca=40; Mg=24; Fe=56

Pesos moleculares:

$CaCO_3 = 100$

Ca equivalente = 32+8,4·(40/24)+0,5·(40/56) = 46,36 mg.

$CaCO_3$ equivalente = 46,36·(100/40) = 115,89 mg.

Dureza total ($CaCO_3$) = 115,89 mg. (36-1)

2.

1 galón = 3,785 lts

Bicarbonatos:

$Ca(HCO_3)_2$ (162)

$Mg(HCO_3)_2$ (146)

$Fe(HCO_3)_2$ (178)

Otros:

$Ca(OH)_2$ (74)

CaO (56)

Los números entre paréntesis son los pesos moleculares.

Reacciones de ablandamiento del agua (10):

(1) $Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O$

(2) $Mg(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow MgCO_3\downarrow + 2H_2O$

(3) $Fe(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow FeCO_3\downarrow + 2H_2O$

Cálculo de los bicarbonatos:

$Ca(HCO_3)_2$ = 32·(162/40) = 129,6 mg.

$Mg(HCO_3)_2$ = 8,4·(146/24) = 51,1 mg.

$Fe(HCO_3)_2$ = 0,5·(178/56) = 1,6 mg.

Cálculo del $Ca(OH)_2$ consumido:

$Ca(OH)_2$ (1) = 129,6·(74/162) = 59,20 mg

$Ca(OH)_2$ (2) = 51,1·(74/146) = 25,90 mg

$Ca(OH)_2$ (3) = 1,6·(74/178) = 0,67 mg.

Total $Ca(OH)_2$ = 85,77 mg

(4) $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH$

CaO (4) = 85,77·(56/74) = 64,91 mg/lts

H_2O = 1000x3,785 = 3785 lts

CaO total consumido = 64,91x3785 = 245684,35 mg.

CaO comercial = 245684,35/0,95 = 258615,11 mg.

Cal comercial = $2,58615x10^{-4}$ ton.

1 tonelada de esta cal cuesta 8,5x100 = 850 ctvs de dólar.

Precio de la cal = $850x2,58615x10^{-4}$ = 0,22 ctvs

Precio de la cal = 0,22 ctvs (36-2)

EJERCICIO N° 37 (9)

Calentando en un crisol a 1100°C una mezcla de magnetita y carbono, se produce hierro metálico.

Los gases producidos durante el proceso promedian 80%CO y 20%CO_2.

PREGUNTAS

1. El consumo de carbono, en libras de carbono reaccionando por libra de hierro producido.
2. El volumen de gases producidos, en pies cúbicos (C.N) por tonelada de hierro producido.
3. El volumen del gas producido por tonelada de hierro, medido a 1100°C y 740 mm de presión total.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Fe=56; C=12; O=16

Pesos moleculares:

Fe_3O_4 = 56x3+16x4 = 232

La reacción que ocurre es la siguiente:

$$Fe_3O_4 + C \Leftrightarrow 3Fe + 2CO + CO_2$$

Debemos calcular el gas producido en las proporciones establecidas por el ejercicio, para a partir de ello poder determinar el C. Pero para realizar el cálculo del gas debemos primero calcular la cantidad de magnetita que es la que aporta el oxígeno para el gas, de acuerdo a la reacción planteada.

Base = 1 lb de Fe.

Fe_3O_4 = 1·(232/3x56) = 1,381 lb

El cálculo del gas lo vamos a realizar de conformidad con la siguiente expresión:

$$ft^3 \text{ de gas} = \frac{\text{O total en gas}}{O/ft^3 \, de \text{ gas}}$$

Esto significa que los pies cúbicos de gas se consiguen dividiendo el oxígeno total en los gases por el oxígeno que tiene un ft^3 de gas.

Si al Fe_3O_4 le restamos el Fe encontramos el O:

O total en gas = 1,381-1 = 0,381 lb

Asumamos 1 ft^3 de gas:

En 1 ft^3 de gas: CO = 0,8 ft^3 y CO_2 = 0,2 ft^3

Recordemos que el peso molecular expresado en libras, ocupa 359 ft^3 a C.N:

O en CO = 0,8·(16/359) = 0,036 lb

O en CO_2 = 0,2·(32/359) = 0,018 lb

O/ft^3 de gas = 0,036+0,018 = 0,054 lb

Gas = 0,381 lb ÷ 0,054 lb/ft^3 = 7,056 ft^3/lb de Fe producido

C en CO = 7,056x0,8·(12/359) = 0,189 lb
C en CO_2 = 7,056x0,2·(12/359) = 0,047 lb
Total C = 0,189+0,047 = 0,236 lb
C = 0,236 lb/lb de Fe (37-1)

2.
1 tonelada corta = 2000 lb
Gas/lb de Fe producido = 7,056 ft^3
Gas/ton. De Fe producido = 7,056x2000 = 14112 ft^3
Gas = 14112 ft^3/tonelada de Fe producido (37-2)

3.
Debemos llevar este gas a las condicione dadas, aplicando la let de los gases ideales:

P_1 = 960 mm P_2 = 740 mm
T_1 = 273K T_2 = 1373K
V_1 = 14112 ft^3 V_2 =?

V_2 = 14112·(760/273) · (1373/740) = 72892 ft^3
V_2 = 72892 ft^3 (37-3)

EJERCICIO Nº 38 (9)

Una mezcla de 50%CO y 50%CO_2 se pasa dentro de un horno de laboratorio a la velocidad de 100 ml/min, y deposita C por la reacción

$$2CO \Leftrightarrow CO_2 + C$$

El gas que sale del horno contiene 51%CO_2 y 49%CO.

PREGUNTAS

1. Calcular la cantidad de carbono depositado en el horno, en mg/hr.

SOLUCION

1.
Dado que la reacción no se realiza por completo, habrá que calcular la cantidad de CO que se descompone/min.

Al inicio:	0,5		0,5
	2CO	⇔	CO_2 + C
Al final:	0,5-2x		0,5+x

x = moles de CO_2 formados
0,5+x = moles de CO_2 al final del proceso
0,5-2x = " CO " "
Total de moles en equilibrio = 0,5-2x + 0,5+x = 1-x
1) fracción molar del CO = (0,5-2x)/(1-x) = 0,49
2) " " CO_2 = (0,5+x)/(1-x) = 0,51

Despejando "x" en (1):
x = 0,006623 moles

Despejando "x" en (2):
x = 0,006623.

Al final:
CO = 0,5-0,006623x2 = 0,486754 = 49%
CO_2 = 0,5+0,006623 = 0,506623 = 51%
0,993377

De acuerdo a la reacción:

C depositado = 0,0013246·(12/2x22,4) = 0,000355 g/min

C depositado = 0,000355·(g/min) · (1000mg/1 g) · (60 min/1 hr) = 21,2882

C depositado = 21,3 mg/hr (38-1)

EJERCICIO Nº 39 (9)

100 toneladas de plomo duro (98%Pb, 2%Sb), se funden en una olla de acero y entonces se tratan con 2 toneladas de PbO (ver Fig. 6). Los productos son:

1) Una escoria consistente en PbO y Sb_2O_3, analizando 20%Sb.

2) Una aleación de Pb-Sb de bajo contenido de Sb y un contenido de oxígeno despreciable.

PREGUNTAS

1. Calcular el contenido de antimonio en la aleación.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

Pb = 207,2; Sb = 121,8

Pesos moleculares:

Sb_2O_3 = 291,6

PbO = 223,2

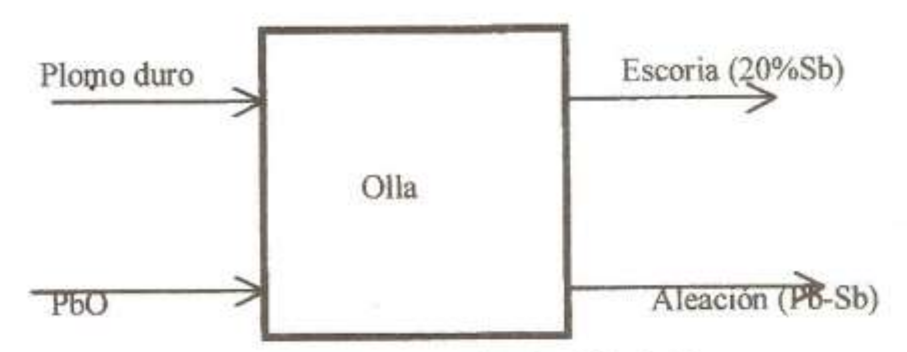


Figura Nº 6: Preparación de aleación de Pb.

Distribución de la composición de la escoria y su peso:

%Sb_2O_3 en escoria = 20·(291,6/243,2) = 24%

%O_2 en Sb_2O_3 de escoria = 24-20 = 4%

%PbO en escoria = 100-24 = 76%

%O_2 en PbO escoria = 76·(16/223,2) = 5,4%

%O_2 total en escoria = 4+5,4 = 9,4%

%Pb = 76-5,4 = 70,6%

El oxígeno de la carga está en forma de PbO:

Peso de O_2 en la carga = 2·(16/223,2) = 0,14 ton.

Cálculo del peso de la escoria:

Sea x = peso de la escoria

0,14 = 0,094x ∴

x = escoria = 0,14/0,094 = 1,5 ton.

Pb en PbO cargado = 2·(207,2/223,2) = 1,86 ton

Pb escoria = 1,5x0,706 = 1,06 ton

Sb escoria = 1,5x0,2 = 0,3 ton

Sb total = Sb(escoria) + Sb(aleación) = 2 ton

Pb total = Pb(escoria) + Pb(aleación) = 98+1,86 = 99,86 ton
Sb aleación = 2-0,3 = 1,7 ton
Pb aleación = 99,86-1,06 = 98,8 ton
Aleación = 98,8+1,7 = 100,5 ton
Sb aleación = (1,7/100,5)x100 = 1,69%
Sb aleación = 1,69% (39-1)

EJERCICIO N° 40 (9)

En un crisol de platino, bajo una atmósfera inerte se funde una escoria cuyo análisis es: FeO=55%, Fe_2O_3=10%, SiO_2=35%, y se halla que 100 g. de escoria pierden 1 gramo de hierro que se disuelve como Fe en el platino sólido.

No hay pérdidas de Si ni de O.

PREGUNTAS

1. Determinar el análisis de la escoria después de la fusión, como %FeO, %Fe_2O_3 y %SiO_2.

SOLUCION

1.

En este caso, debido a que el grado de oxidación del Fe en la forma Fe_2O_3 es mayor que en la forma FeO, debe descomponerse algo del primero; pero como no hay pérdida de oxígeno debe oxidarse algo del segundo, veamos las siguientes reacciones:

(1) $Fe_2O_3 \Leftrightarrow 2Fe + 3\,O$
(2) $2FeO + O \rightarrow Fe_2O_3$

Inicialmente:

FeO = 55 g
Fe_2O_3 = 10 g
SiO_2 = 35 g
100 g

Se disuelve 1 g de Fe que sale del Fe_2O_3 que se descompuso, por tanto, de acuerdo a (1):

Fe_2O_3 descompuesto = 1·(160/112) = 1,43 g.
O de este = 1,43-1 = 0,43 g.

De acuerdo a (2):

FeO → Fe_2O_3 = 0,43·(2x72/16) = 3,87 g
Fe_2O_3 formado = 0,43·(160/16) = 4,3 g

Pesos finales:

Fe_2O_3 = 10-1,43+4,3 = 12,87 g
FeO = 55-3,87 = 51,13 g
SiO_2 = 35,o g

Composición final de la escoria (40-1)

Fe_2O_3	= 12,87 g	= 13,00%
FeO	= 51,13 g	= 51,65%
SiO_2	35,00 g	35,35%
	99,0 g	100,00%

EJRCICIO N° 41 (9)

Un concentrado de Zn por flotación, sustancialmente ZnS puro se tuesta a ZnO sin combustible.

Los gases del tostador contienen 6%SO_2 y 1%SO_3, el resto es N_2 y O_2.

PREGUNTAS

1. Calcular la cantidad de aire seco alimentado al aparato tostador, en pies cúbicos por tonelada corta de ZnS estándar.

SOLUCION

1.
Base: ZnS = 1 ton. Corta = 2000 lb
Reacción:

$$ZnS + 3,5\ O_2 = 2ZnO + SO_2 + SO_3$$

Vamos a calcular el volumen del gas así:

$$ft^3 \text{ de gas} = \frac{\text{S total en gas}}{\text{S}/\text{ft}^3 \text{ de gas}}$$

Esto quiere decir que debemos calcular el S que en total poseen los gases y dividirlo por el S que contiene 1 ft^3 de gas:

Debido a que todo el S lo contiene el ZnS:

S total en gas =2000·(32/97,4) = 657,1 lb

Supongamos ahota 1 ft^3 de gas y calculemos cuanto S contiene:

S en SO_2 = 0,06·(32/359) = 0,00535 lb

S en SO_3 = 0,01·(32/359) = 0,00089 lb

S/ft^3 de gas = 0,00535+0,00089 = 0,00624 lb

De acuerdo a la ecuación anterior:

Gas = 657,1/0,00624 = 105304,5 ft^3

Cálculo del aire teórico:

ZnO formado = 2000·(81,4/97,4) = 1671,46 lb

O_2 de este = 1671,46·(16/81,4) · (359/32) = 3685,84 ft^3

Formación del SO_2:

$$S + O_2 = SO_2$$

$O_2 = SO_2$ = 105304,5x0,06 = 6318,27 ft^3

Formación del SO_3:

$$S + 1,5\ O_2 = SO_3$$

$O_2 = 1,5SO_3$ = 105304,5x0,01x1,5 = 1579,57 ft^3

O_2(teórico) = O_2(ZnO)+O_2(SO_2)+O_2(SO_3)

O_2(teórico) = 3685,84+6318,27+1579,57 = 11583,68 ft^3

Gas = SO_2 + SO_3 + N_2(teórico) + aire exceso

De acuerdo a la composición del gas:

N_2(teórico) + aire exceso = 100-6-1 = 93%

Recordar que el aire posee en volumen 79%N_2 y 21%O_2:

N_2(teórico) = 11583,68·(79/21) = 43576,7 ft^3

N_2(teórico) + aire exceso = 105304,5x0,93 = 97933,2 ft^3

Aire exceso = 97933,2-43436,7 = 54356,5 ft^3

Aire total seco = aire teórico + aire exceso

Aire total seco = 43576,7/0,79 + 54436,5 = 109517 ft^3

Aire total seco = 109517 ft^3 por ton. de ZnS (41-1)

EJERCICIO Nº 42 (9)

Se tuestan continuamente con aire seco, 50 toneladas cortas por 24 horas de un concentrado por flotación. Este concentrado contiene:

ZnS = 80% PbS = 5%
FeS_2 = 5% Balance = minerales de ganga inertes.

Supongamos que la tostación convierte:

$ZnS \rightarrow ZnO$

$PbS \rightarrow PbO$

$FeS_2 \rightarrow Fe_3O_4$

Todo el S de estos compuestos entra al producto gaseoso como SO_2 y SO_3.
Los gases que salen del sistema analizan 5%SO_2 y 1,5%SO_3.

PREGUNTAS

1. La cantidad de aire que entra en el tostador, en ft^3/min a C.N.
2. El aire en exceso, como % de la cantidad teóricamente requerida por las reacciones.
3. El análisis completo de los gases que salen del tostador.
4. La cantidad de H_2SO_4 que podría producirse de los gases, suponiendo la conversión de todo el azufre; en toneladas cortas por 24 horas.

SOLUCION

1.

Debemos calcular el volumen gaseoso para poder deducir de él, el aire así:

$$ft^3 \text{ de gas} = \frac{S \text{ total en gas}}{S/ft^3 \text{ de gas}}$$

Concentrado = 50x2000 = 100000 lb

ZnS = 100000x0,8 = 80000lb

PbS = 100000x0,05 = 5000 lb

FeS_2 = 100000x0,05 = 5000 lb

Todo el S que va a los gases se encuentra en los sulfuros:

S en ZnS = 80000x(32/97,4) = 26283,4 lb

S en PbS = 5000n(32/239,2) = 668,9 lb

S en FeS_2 = 5000x(2x32/120) = 2666,7 lb

S total en gas = 26283,4+668,9+2666,7 = 29619 lb

Asumo 1 ft^3 de gas:

S en SO_2 = 0,05x(32/359) = 0,00446lb

S en SO_3 = 0,015x(32/359) = 0,00134 lb

S/ft^3 de gas = 0,00446+0,00134 = 0,0058

Aplicando la ecuación anterior:

Volumen de gas = 29619/0,0058 = 5'106.724 ft^3/24 hr.

Cálculo del O_2 teórico:

Zn cargado = 80000-26283,4 = 53716,6 lb

ZnO formado = 53716,6x(81,4/65,4) = 66858,3 lb

O_2 del ZnO = (66858,3-53716,6) ·(359/32) = 147433 ft^3

Pb cargado = 5000-668,9 = 4331.1 lb

PbO formado = 4331,1x(223,2/207,2) = 4665,5 lb

O_2 del PbO = (4665,5-4331,1)x(359/32) = 3752 ft^3

Fe cargado = 5000-2666,7 = 2333,3 lb

Fe_3O_4 formado = 2333,3·(232/3x56) = 3222,2 lb

O_2 del Fe_3O_4 = (3222,2-2333,3)·(359/32) = 9972 ft^3

$S + O_2 = SO_2$

$O_2 = SO_2$ = 5'106724x0,05 = 255336 ft^3

$S + 1,5\ O_2 = SO_3$

SO_3 = 5'106724x0,015 = 76601 ft^3

O_2 del SO_3 = 76601x1,5 = 114901 ft^3

O_2 teórico total = 147433+3752+9972+255336+114901 = 531394 ft^3/24 hr

Aire teórico = 531394/0,21 = 2'530448 ft^3

N_2 teórico = 2'530448 – 531394 = 1'999054 ft^3

Gas = SO_2 + SO_3 + N_2 teórico + aire exceso

N_2 teórico + aire exceso = 100-5-1,5 = 93,5%

N_2 teórico + aire exceso = 5'106724x0,935 = 4'774787 ft^3

Aire exceso = 4'774787-1'999054 = 2'775733 ft^3
Aire total/24 hr = 2'775733+2530448 = 5'306181 ft^3/24 hr
Aire al tostador = (5'306181 ft^3/24 hr)x(1 hr/60 min) = 3685 ft^3/min
Aire al tostador = 3685 ft^3/min (42-1)

2.

Aire en exceso = 2,775.733 ft^3
Aire exceso = (2'775.733/2'530.448)x100 = 109,7%
Aire exceso = 109,7% (42-2)

3.

N_2 total = 1'999.054+2'775.733x0.79 = 4'191.883 ft^3
O_2(aire exceso) = 2'775.733x0,21 = 582904 ft^3

Composición del gas (42-3)

N_2 =	4'191.883 ft^3 =	82,09%
O_2 =	582.904 =	11,41%
SO_2=	255.336 =	5,00%
SO_3=	76.601 =	1,50%
	5'106.724	100,00%

4.

S total en gas = 29619 lb
H_2SO_4 = 296193(92/32) = 90908,2 lb/24 hr
H_2SO_4 = 90708,2/2000 = 45,4 ton./24 hr
H_2SO_4 que podrían producir los gases = 45,4 ton/24 hr. (42-4)

EJERCICIO Nº 43 (9)

En un horno se quema pirita (FeS_2) con un exceso de aire, para producir Fe_2O_3 y SO_2.

Los gases de la combustión procedentes del horno contienen 6,3% de SO_2, siendo el resto N_2 y O_2.

PREGUNTAS

1. Calcular por tonelada métrica de pirita, el consumo de aire teórico en m^3 a condiciones normales.
2. El consumo real de aire en metros cúbicos a C.N, por tonelada métrica de pirita.
3. El porcentaje de aire en exceso.
4. El volumen de los gases productos de la combustión.

SOLUCION

1.

Base = 1 ton. métrica = 1000 Kg. de pirita.
Pesos moleculares:

FeS_2 = 120
Fe_2O_3 = 160
SO_2 = 64
O_2 = 32

Reacción de combustión:

$$2FeS_2 + 5,5\ O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 4SO_2$$

O_2 teórico = 1000·(5,5x22,4/2x120) = 513 m^3
Aire teórico = 513/0,21 = 2444 m^3
Aire teórico = 2444 m^3 (43-1)

2.

El aire real está compuesto por aire teórico + aire exceso = O_2(aire teórico) + N_2 total + O_2(aire exceso):

Gases de combustión = SO_2 + N_2 total + O_2(aire exceso)
De acuerdo a la reacción:

$SO_2 = 513\cdot(4/5{,}5) = 373\ m^3$
$N_2 + O_2$(aire exceso) = 100-6,3 = 93,7% de los gases de combustión.
$N_2 + O_2$(aire exceso) = $373\cdot(93{,}7/6{,}3) = 5548\ m^3$
Aire real = 5548+513 = 6061 m^3

Aire real = 6061 m^3 (43-2)

3.

Aire exceso = 6061-2444 = 3617 m^3
Aire exceso = (3617/2444)x100 = 148%

Aire exceso = 148% (43-3)

4.

Gases de combustión = 373/0,063 = 5921 m^3

Productos de combustión = 5921 m^3 (43-4)

EJERCICIO Nº 44 (9)

Una mezcla de calcopirita ($CuFeS_2$), pirita (FeS_2) y calcosita (Cu_2) analiza: Cu=3(%, Fe=30%, S=40%.

PREGUNTAS

1. Calcular el análisis mineralógico.

SOLUCION

1.

El cálculo del análisis mineralógico, consiste en determinar la composición de la mezcla en función de las especies minerales. Para ello, la composición elemental dada la distribuimos entre los compuestos correspondientes. Veamos:

Pesos atómicos:

Cu=64, Fe=56, S=32

Pesos moleculares:

$CuFeS_2$=184
Cu_2S=160
FeS_2=120

Primero calculamos la composición elemental de cada compuesto:

Contenido de en $CuFeS_2$:

Cu = (64/184) · 100 = 34,78%
Fe = (56/184) · 100 = 30,44%
S = 100-34,78-30,44 = 34,78%

Contenido de en Cu_2S:

Cu = (64x2/160)x100 = 80%
S = 100-80 = 20%

Contenido de en FeS_2:

Fe = (56/120)x100 = 46,67%
S = (2x32/120)x100 = 53,33%

Sea:

X = $CuFeS_2$
Y = FeS_2
Z = Cu_2S

Ecuaciones:

(1) S: $40 = 0{,}3478X + 0{,}5333Y + 0{,}20Z$
(2) Cu: $30 = 0{,}3478X + 0{,}80Z$
(3) Fe: $30 = 0{,}3044X + 0{,}4667Y$

Al resolver este sistema de ecuaciones da los siguientes resultados:

X = 19,5%, Y = 51,5%, Z = 29%

Análisis mineralógico (44-1)

$CuFeS_2$ = 19,5%
FeS_2 = 51,5%
Cu_2S = 29,0%

CAPITULO IV

COMBUSTIBLES Y COMBUSTION

EJERCICIO Nº 1 (7)

Un horno utilizado para fundir bronce, usa coque como combustible. La composición del coque es la siguiente:

C	82%
H	4
H_2O	2
Residuo	12

Las cenizas del horno suman el 15% del peso del coque. Se utiliza un 60% más del aire requerido teóricamente por la combustión.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire teóricamente requeridos para la combustión de 1 Kg. de coque. Calculado por el método del peso.

2. El volumen de aire real utilizado por kilogramo de coque.

3. El volumen de los productos de combustión, cuando se utilizan solamente los requerimientos de aire teórico. Calcular por el método del peso y cambiar a volumen.

4. El volumen y composición (%) de los productos de combustión (incluyendo el aire exceso). Calculado directamente por el método del volumen.

SOLUCION

1.

Es necesario antes que todo, establecer algunos datos básicos que se utilizarán en la resolución de este tipo de problemas:

COMPOSICION DEL AIRE

Gas	Por volumen (%)	Por peso (%)
Oxígeno	21,0	23,2
Nitrógeno	79,0	76,8
Aire seco	100,0	100,0

En condiciones normales, 1 m^3 de aire pesa 1,293 Kg.
En condiciones normales, 1 ft^3 de aire pesa 0,0807 lb.
Peso molecular del aire = 29.

La parte de un combustible sólido que no es combustible, se denomina "residuo" (r), y está compuesta por SiO_2, Al_2O_3, CaO y otras materias inorgánicas.

También existen algunas partículas que siendo combustibles, escapan mecánicamente de la combustión y todas ellas, cualquiera sea su naturaleza se asume que son carbono y se denominan "carbono sin quemar" (U.C). este carbono sin quemar, para efectos de cálculos hay que deducirlo del C total del combustible.

El residuo y el carbono sin quemar forman lo que se denomina "cenizas"., por tanto:

Cenizas = Residuo (R) + Carbono sin quemar (U.C). (1)

En la composición del coque del ejercicio, existen dos elementos combustibles que son el C y el H. Ellos realizan las siguientes reacciones de combustión:

(1) $C + O_2 = CO_2$

(2) $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$

Salvo que se diga lo contrario, siempre se considera que los elementos combustibles realizan combustión completa, por ejemplo, el C produce CO_2 y nada de CO en la combustión. El H_2 va a producir agua.

Para calcular el aire teóricamente requerido, necesitamos determinar el oxígeno que consumen las reacciones (1) y (2), para con la ayuda de la tabla propuesta al principio transformar este oxígeno en aire.

El C de la reacción (1) no es todo el de la composición, pues una parte se va con las cenizas, pero para realizar su cálculo utilizaremos la ecuación (1):

Cenizas = (R) + U.C

Cenizas = 15% del peso del carbón
Residuo = 12% del carbón
15% = 12% + U.C
U.C = 15-12 = 3%

Como estamos tratando 1 Kg. de coque, si C = carbono de la reacción (1):
C = 0,82-0,03= 0,79 Kg.
Cálculo del oxígeno:
Dado que los pesos atómicos son: C=12, H =1, O=16, hagamos la siguiente regla de tres:
Reacción (1):

C		O
12	→	32
0,79	→	x

x = O(reacción 1) = 0,79 · (32/12) = 2,106 Kg.
O(reacción 2) = 0,04 · (16/2) = 0,32 Kg.

El oxígeno consumido por las reacciones se denomina "teórico", y el aire calculado a partir de él también será teórico.

O teórico = 2,196+0,32 = 2,426 Kg.
Aire teórico = 2,426/0,232 = 10,46 Kg.
Aire teórico = 10,46 Kg.(1 m^3/1,293 Kg.) = 8,09 m^3

1 p = 0.315 m
1 p³ = 0.04324 m³.
187.10 p³

Aire teórico = 8,09 m^3 (1-1)

Debido a que el oxígeno fue calculado primero en peso y luego trasladado a volumen, este método se denomina "Método del Peso".

2.

El aire exceso es una cantidad adicional al de las reacciones para garantizar que la reacción sea completa y se expresa como un (%) del aire teórica. Sin él, la reacción será incompleta y se producirá también CO y otros gases.
El aire real es la suma del teórico más el exceso, por tanto, si el teórico es el 100% y el exceso es el 60%, el real será el 160%. Veamos la siguiente regla de tres:

m^3	%
8,09	100
x	160

Aire real = aire total = x = 8,09·(160/100) = 8,09x1,6 = 12,94 m^3

Aire total = 12,94 m^3 (1-2)

299.3 p³

3.

Los productos de combustión están compuestos por todos los gases que quedan después de que ocurren las reacciones de combustión. En este caso, trataremos la reacción idealmente, es decir sin el aire en exceso, por tanto:

Productos de combustión = N_2(aire teórico)+CO_2(reacción 1) + H_2O(reacción 2) + H_2O (coque)

Pesos moleculares:

CO_2 = 44, H_2O = 18, N_2 = 28.

Una mol de gas (Kg.) a C.N ocupa 22,4 m^3.

Peso del CO_2 = 0,79x(44/12) = 2,89 Kg.
Volumen de CO_2 = 2,89·(22,4/44) = 1,471 m^3
H_2O (reacción 2) = 0,04·(18/2) · (22,4/18) = 0,448 m^3
H_2O (coque) = 0,02·(22,4/18) = 0,025 m^3
H_2O total = 0,448+0,025 =0,473 m^3
N_2(aire teórico) = 10,46-2,43 = 8,03 Kg.
N_2 (aire teórico) = 8,03·(22,4/28) = 6,424 m^3
Volumen de los gases = 6,424+1,471+0.473 = 8.368 m^3

Productos de combustión = 8,368 m^3 (1-3)

193.52 p³

4.

Hay que decir que de la única manera que aparece el O_2 en los productos de combustión, es cuando se ha introducido aire en exceso, en este caso, los productos de combustión (P.C) serán:

P.C = N_2(aire teórico)+N_2(aire exceso)+O_2(aire exceso) + H_2O total + CO_2(reacción 1)

Aire exceso = aire total – aire teórico

Aire exceso = 12,94 – 8,09 = 4,85 m^3

Productos de combustión con aire exceso = 8,368+4,85 = 13,218 m^3 (1-4)

N_2 exceso = 4,85x0,79 = 3,83 m^3

N_2 total = 6,42+3,83 = 10,25 m^3

O_2 aire exceso = 4,85 – 3,83 = 1,02 m^3

Composición del gas(1-4):

CO_2	= 1,471 m^3	= 11,13%
H_2O	= 0,473 m^3	= 3,58%
O_2	= 1,020 m^3	= 7,72%
N_2	= 10,25 m^3	= 77,57%
	13,214	100.0%

EJERCICIO Nº 2 (7)

Un horno para fundición quema carbón pulverizado de la siguiente composición:

C	76,0%	S	1,2%
H	4,9	H_2O	1,5
O	7,8	R	6,9
N	1,7		

A los quemadores se les suministra 30% más de aire que el teóricamente requerido para la combustión completa del carbón.

PREGUNTAS

1. Cuantos kilogramos de aire se suministran por kilogramo de carbón?
2. Los metros cúbicos de aire por kilogramo de carbón, calculados a partir de los requerimientos de la pregunta 1 y también directamente por el método del volumen.
3. Los pies cúbicos de aire por libra de carbón.
4. El peso total de los productos de combustión por kilogramo de carbón.
5. El total de metros cúbicos de los productos de combustión por kilogramo de combustible. Utilizar el método directo del volumen.
6. Por libra de carbón, los pies cúbicos de productos de combustión.

SOLUCION

1.

Los elementos combustibles en este carbón son: C, H y S

Las reacciones de combustión son:

(1) $C + O_2 = CO_2$

(2) $H_2 + ½ O_2 = H_2O$

(3) $S + O_2 = SO_2$

Pesos atómicos:

C=12, O=16, H=1, N=14, S=32

Pesos moleculares:

H_2O = 18

SO_2 = 64

Cálculo del oxígeno de las reacciones:

En (1): O del C = 0,67·(32/12) = 2,026 Kg.

En (2): O del H = 0,049·(16/2) = 0,392 Kg.

En (3): O del S = 0,012·(32/32) = 0,012 Kg.

Total O de reacciones = 2,206+0,392+0,012 = 2,43 Kg.
El aire no suministra todo el oxígeno que necesitan las reacciones puesto que el carbón tiene una parte que habrá que restársela al total para poder determinar lo que suministra el aire.

O del carbón = 0,078 Kg.
O del aire teórico = 2,43 – 0,078 = 2,352 Kg.
El aire total es el teórico (100%) + el exceso (30%) = 130%. En estas mismas proporciones está el oxígeno del aire.

O total = 2,352x1,3 = 3,058Kg.
Dado que de acuerdo a la tabla del ejercicio anterior, el aire posee 23,2% de oxígeno en peso:
Aire total = 3,058/0,232 = 13,18 Kg.

Aire total requerido = 13,19 Kg. (2-1)

2.

a.
Recordar que 1 m^3 de aire pesa 1,293 Kg. ∴
De acuerdo a (2-1):
Aire = 13,19/1,293 = 10,19 m^3

Aire total = 10,19 m^3 (2-2.a)

b. Método del Volumen:
Recordar que a C.N, una mol de gas (Kg.) ocupa 22,4 m^3.
Cálculo del O_2:

O_2 del C = 0,76·(22,4/12) = 1,418 m^3
O_2 del H = 0,049·(11,2/2) = 0,274 m^3
O_2 del S = 0,012·(22,4/32) = 0,0084 m^3
O_2 del carbón = 0,078·(22,4/32) = 0,0546 m^3
O_2 teórico = 1,418+0,274+0,0084-0,0546 = 1,646 m^3
O_2 total = 1,646x1,3 = 2,14 m^3
Aire total = 2,14/0,21 = 10,19 m^3
Aire total = 10,19 m^3 (2-2.b)

3.
Recordar que a C.N, una libra-mol de gas ocupa 359 ft^3.
Cálculo del oxígeno:

O_2 del C = 0,76·(359/12) = 22,736 ft^3
O_2 del H = 0,049·(359/4) = 4,397 ft^3
O_2 del S = 0,012·(359/32) = 0,135 ft^3
O_2 del carbón = 0,078·(359/32) = 0,875 ft^3
O_2 teórico = 22,736+4,397+0.135-0,875 = 26,393 ft^3
O_2 total = 26,393·(130/100) = 34,31 ft^3
Aire total = 34,31/0,21 = 163,3 ft^3
Aire total = 163,3 ft^3 (2-3)

4.
Cálculo de los productos de combustión (P.C):
P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + N_2 + O_2
H_2O = H_2O(reacción) + H_2O(combustible)
N_2 = N_2(aire) + N_2(combustible)
O_2 = del aire exceso.

CO_2 = 0,76·(44/12) = 2,786 Kg.
H_2O(reacción) = 0,049·(18/2) = 0,441 Kg.
H_2O(combustible) = 0,015 Kg.
H_2O total = 0,441+0,015 = 0,456 Kg.
SO_2 = 0,012·(64/32) = 0,024 Kg.
N_2(comb.) = 0,017 Kg.
N_2(aire) = 13,19 – 3,058 = 10,122 Kg.
N_2 total = 10,122+0,017 = 10,139 Kg.

O_2 exceso = 3,058 – 2,352 = 0,692 Kg.
P.C = 2,786 + 0,456 + 0,024 + 10,139 + 0,692 = 14,094 Kg.
Productos de combustión = 14,094 Kg. (2-4)

5.

CO_2 = 0,76·(22,4/12) = 1,418 m^3
H_2O(reacción) = 0,274x2 = 0,548 m^3
H_2O(comb.) = 0,015·(22,4/18) = 0,019 m^3
H_2O total = 0,548 + 0,019 = 0,567 m^3
SO_2 = 0,008 m^3
N_2(comb.) = 0,017·(22,4/28) = 0,0136 m^3
N_2 del aire = 10,19 – 2,14 = 8,05 m^3
N_2 total = 8,064 m^3
O_2 exceso = 2,14 – 1,65 = 0,49 m^3
Total productos de combustión = 10,50 m^3 (2-5)

6.

Sobre la base de los datos de la respuesta (3.):
CO_2 = O_2 del C = 22,736 ft^3
H_2O = 2 O_2 del H = 4,397x2 = 8,794 ft^3
SO_2 = O_2 del S = 0,135 ft^3
O_2 exceso = 26,393x0,3 = 7,918 ft^3
= 34,31 – 26,393
N_2 = 0,017·(359/28) + 163,3x0,79 = 129,225 ft^3
Total productos de combustión = 22,736+8,974+0,135+7,918+129,225 = 168,803 ft^3
Total P.C = 169 ft^3 (2-6)

EJERCICIO N° 3 (7)

Una muestra de carbón presenta la siguiente composición:

C	87,43%
H	2,26
O	0,54
H_2O	8,21
R	1,56

Este carbón es quemado con 20% de aire en exceso. El aire se encuentra a 15°C y la presión barométrica es de 748 mm-Hg, asumido seco.

Las cenizas del horno equivalen a 2% del peso del carbón.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire, en pies cúbicos acondiciones normales, que es teóricamente requerido para quemar 1 libra de carbón; calculado por el método del peso.
2. Lo anterior, pero calculado por el método directo del volumen.
3. El volumen de aire realmente usado, a las condiciones dadas.
4. El peso del aire utilizado, en libras.
5. El volumen y composición , (%), de los productos de combustión.
6. El peso de los productos de combustión.

SOLUCION

1.

Elementos combustibles: C y H
Reacciones de combustión:

(1) $C + O_2 = CO_2$
(2) $H_2 + ½ O_2 = H_2O$

Recordando la ecuación (1):
Si: R = residuo y U.C = carbono sin quemar:

Cenizas = R + U.C
2 = 1,56 + U.C ∴
U.C = 2 – 1,56 = 0,44%
Carbono quemado = 87,43 – 0,44 = 86,99%

Base = 1 libra de carbón
Cálculo del oxígeno de las reacciones:

O del C = 0,8699·(32/12) = 2,3191 lb.
O del H = 0,0226·(16/2) = 0,1808 lb
O del combustible = 0,0054 lb
O del aire teórico = 2,3197 + 0 1808 – 0,0054 = 2,4951 lb
Aire teórico = 2,4952/0,23 = 10,848 lb
1 ft^3 de aire pesa 0,0807 lbs. A C.N ∴
Aire teórico = 10,848/0,0807 = 134 ft^3

Aire teórico = 134 ft^3 (3-1)

2.
Método del Volumen:

O_2 del C = 0,8699·(359/12) = 26,0245 ft^3
O_2 del H = 0,0226·(359/4) = 2,02835 ft^3
O_2 del carbón = 0,0054·(359/32) = 0,06058 ft^3
O_2 teórico = 26,0245 + 2,02835 – 0 06958 = 27,99227 ft^3
Aire teórico = 27,99227/0,21 = 133 ft^3

Aire teórico = 133 ft^3 (3-2)

3.
Hay un 20% de aire exceso, por tanto:
Aire total = 133x1,2 = 159,6 ft^3 a C.N
1 ft^3 = 0,02832 m^3

Aire total = 159,6x0,02832 = 4,52 m^3 a C.N

Pasamos a las condiciones dadas:

P_1 = 760 mm	P_2 = 748 mm
T_1 = 273K	T_2 = 15+273 = 288K
V_1 = 4,52 m^3	V_2 =?

V_2 = 4,52x(760/273) · (288/748) = 4,84 m^3 = 170,9 ft^3

Aire total a condiciones dadas = 170,9 ft^3 = 4,84 m^3 (3-3)

4.

Aire teórico = 10,848 lb (C.N)
Aire total = 10,848x1,2 = 13,01 lb

Peso del aire = 13,01 lbs. (3-4)

5.
Productos de combustión = P.C:
P.C = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

CO_2 = 0,8699·(359/12) = 26,0245 ft^3
H_2O(reacción) = 2,02835x2 = 4,0567 ft^3
H_2O(comb.) = 0,0821·(359/18) = 1,6375 ft^3
Total H_2O = 4,0567 + 1,6375 = 5,6942 ft^3
Aire total = 159,60 ft^3
N_2 = 159,60x0,79 = 126,084 ft^3
Aire exceso = 159,6 – 133 = 26,6 ft^3
O_2 de exceso = 26,6x0,21 = 5,586 ft^3
P.C total = 26,0245+5,6942+126,084+5,586 = 163,40 ft^3

Volumen de P.C = 163,40 ft^3 (3-5)
Composición de los productos de combustión (3-5)

CO_2	= 15,9%
H_2O	= 3,5%
N_2	= 77,2%
O_2	= 3,4%

6.

CO_2 = 0,8699·(44/12) = 3,19 lb
H_2O = ,0226·(18/2)+0,0821 = 0,2855 lb
N_2 = 126,084·(28/359) = 9,833 lb
O_2 = 5,586·(32/359) = 0,498 lb
P.C = 3,19+0,2855+9,833+0,498 = 13,8065 lb

Peso de los P.C = 13,81 lb. (3-6)

EJERCICIO Nº 4 (7)

Un horno metalúrgico utiliza carbón bituminoso de la siguiente composición:

C	72,2%	O	7,8%
H	5,0	S	0,8
N	1,7	R	12,5

¼ de las cenizas son carbono sin quemar. El aire afuera se encuentra a 22°C y 751 mm de presión barométrica. Se utiliza 50% de aire en exceso.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de aire (C.N) que son teóricamente requeridos, para quemar 1 libra de carbón.
2. Los pies cúbicos de aire realmente usado a las condiciones dadas.
3. El volumen de los productos de combustión, en pies cúbicos; y su composición en porcentaje.
4. Los metros cúbicos de aire realmente utilizado (C.N), por kilogramo de carbón.
5. El volumen de los productos de combustión, en metros cúbicos y su composición en porcentajes.

SOLUCION

1.

Cenizas = R + U.C

4/4 = ¾ + ¼

Hagamos la siguiente regla de tres:

$12{,}5 \rightarrow 0{,}75(3/4)$

$x \rightarrow 0{,}25(1/4)$

$x = U.C = 0{,}25x12{,}5/0{,}75 = 4{,}2\%$

U.C = carbono sin quemar y R = residuo.

Carbono quemado = 0,722 – 0,042 = 0,68 lbs.

Elementos combustible: C, H y S.

Reacciones de combustión:

(1) $C + O_2 \rightarrow CO_2$

(2) $H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$

(3) $S + O_2 \rightarrow SO_2$

Cálculo del oxígeno teórico:

O_2 del C = 0,68·(359/12) = 20,343 ft^3

O_2 del H = 0,05·(359/4) = 4,487 ft^3

O_2 del S = 0,008·(359/32) = 0,0897 ft^3

O_2 del carbón = 0,078·(359/32) = 0,875 ft^3

O_2(aire teórico) = 20,343+4,487+0,0897 – 0,875 = 24,0447 ft^3

Aire teórico = 24,0447/0,21 = 114 ft^3

Aire teórico (C.N) = 114 ft^3 (4-1)

2.

Recordar que 1 ft^3 = 0,0283 m^3

Aire total = 144x1,5 = 171,0 ft^3 = 4,8393 m^3

Cambio de condiciones:

$V_1 = 171{,}0\ ft^3$	$V_2 = ?$
$P_1 = 760$ mm	$P_2 = 751$ mm
$T_1 = 273K$	$T_2 = 273+22 = 295K$

$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) = 188\ ft^3 = 5{,}29\ m^3$

Volumen real del gas a condiciones dadas = 188 ft^3 (4-2)

3.

Productos de combustión (P.C):

P.C = $CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$(exceso).

CO_2 = O_2 del C = 20,343 ft^3

H_2O = 2 O_2 del H = 2x4,487 = 8,974 ft^3

SO_2 = O_2 del S = 0,0897 ft^3

N_2 del carbón = 0,017·(359/28) = 0,22 ft^3

N_2 del aire = 171x0,79 = 135,09 ft^3
N_2 total = 0,22 + 135,09 = 135,31 ft^3
Aire exceso = 171 – 114 = 57 ft^3
O_2(aire exceso) = 57x0,21 = 11,97 ft^3

El gas P.C, será (4-3)

CO_2 =	20,343 ft^3	=	11,51%
H_2O =	8,974 ft^3	=	5,08
SO_2 =	0,089 ft^3	=	0,05
N_2 =	135,31 ft^3	=	76,58
O_2 =	11,97 ft^3	=	6,78
Total	**176,6867 ft^3**	=	**100,00%**

4.
Tomando como base 1 Kg. de carbón:

O_2 del C = 0,68·(22,4/12) = 1,27 m^3
O_2 del H = 0,05·(22,4/4) = 0,28 m^3
O_2 del S = 0,008·(22,4/32) = 0,0056 m^3
O_2 del carbón = 0,078·(22,4/32) = 0,0546 m^3
O_2(aire teórico) = 1,27+0,28+0,0056 – 0,0546 = 1,501 m^3
O_2 total del aire = 1,501x1,5 = 2,2515 m^3
Aire total = 2,2515/0,21 = 10,72 m^3

Total aire (C.N) = 10,72 m^3 (4-4)

5.
P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2(aire exceso)

N_2(total) = 10,72x0,79 + 0,017·(22,4/28) = 8,4824 m^3
O_2(exceso) = 2,2515 – 1,501 = 0,7505 m^3

Productos de combustión (4-5):

	Volumen (m^3)	Porcentaje
CO_2	1,27	11,47
H_2O	0,56	5,06
SO_2	0,0056	0,05
O_2	0,7505	6,78
N_2	8,4824	76,64
	11,0685	100,00

Se puede observar que la composición resultante de los productos de combustión, es igual a la del punto # 3, salvo errores de redondeo.

EJERCICIO N°5 (7)

Un horno quema en 24 horas, 9 ½ toneladas métricas del carbón siguiente:

C	76,0%
H	4,5
O	12,5
H_2O	1,0
R	6,0

Se forman 980 Kg. de cenizas. El volumen total de los gases que dejan el hogar en 24 horas es 228000 m^3.

La temperatura medida en el hogar fue de 330°C y la presión de 725 mm,Hg.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire teórico, requerido para quemar el carbón a las condiciones normales.
2. El porcentaje de aire en exceso.

SOLUCION

1.
Peso total del carbón = 9500 Kg.
Este peso del carbón está distribuido así:

C = 9500x0,76 = 7220,0 Kg.

$H = 9500x0,045 = 527,4$ Kg.
$O = 9500x0,125 = 1187,5$ Kg.
$H_2O = 9500x0,01 = 95,0$ Kg.
$R = 9500x0,06 = 570,0$ Kg.

Los elementos combustibles son el C y el H.

Reacciones:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Cenizas = R + U.C

$U.C = 980 - 570 = 410$ Kg.
$C \rightarrow CO_2 = 7220 - 410 = 6810$ Kg.

Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

O_2 del $C = 6810\cdot(22,4/12) = 12712\ m^3$
O_2 del $H = 427,5\cdot(22,4/4) = 2394\ m^3$
O_2 del carbón $= 1187,2\cdot(22,4/32) = 831,25\ m^3$
O_2 aire teórico $= 12712 + 2394 - 831,25 = 14274,75\ m^3$
Aire teórico $= 14274,75/0,21 = 67975\ m^3$

Aire teórico (C.N) = 67975 m^3 (5-1)

2.

El aire exceso lo debemos calcular en base a los productos de combustión (P.C), así:

$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

$CO_2 = O_2$ del $C = 12712\ m^3$

$H_2O = H_2O(\text{reacciones}) + H_2O(\text{carbón})$

H_2O total $= 2394x2 + 95\cdot(22,4/18) = 4960,20\ m^3$
$N_2(\text{aire teórico}) = 67975x0,79 = 53700\ m^3$
P.C total sin aire exceso $= 12712 + 1906 + 53700 = 71318\ m^3$

Este cálculo de los P.C, se ha realizado a C.N; vamos a pasarlo a las condiciones dadas:

$P_1 = 760$ mm	$P_2 = 725$ mm
$T_1 = 273K$	$T_2 = 273+330 = 603K$
$V_1 = 71318\ m^3$	$V_2 = ?$

Aplicando la ley de los gases ideales:

$V_2 = V_1\cdot(P_1/T_1)\cdot(T_2/P_2)\ \therefore$
$V_2 = 71318\cdot(760/273)\cdot(603/725) = 165131\ m^3$

Este volumen es a las condiciones reales, para poderlo comparar con el volumen de los productos de combustión.

Aire exceso a condiciones dadas $= 228000 - 165131 = 62869\ m^3$

Dado que el aire teórico fue calculado a C.N, el aire exceso debemos llevarlo a las mismas condiciones para poderlos comparar.

$P_1 = 760$ mm	$P_2 = 725$ mm
$T_1 = 273K$	$T_2 = 603K$
$V_1 = ?$	$V_2 = 62869\ m^3$

$V_1 = 62869\cdot(725/603)\cdot(273/760) = 27152\ m^3$
Aire exceso $= 100\cdot(27152/67975) = 39,94\%$

Aire exceso = 40,0% (5-2)

EJERCICIO N°6 (7)

Una muestra de carbón tiene la siguiente composición:

C	73,9%	N	1,4%
H	4,8	H_2O	5,4
O	8,8	R	5,7

Cuando este carbón fue utilizado en un horno, las cenizas contenían 18% de carbono sin quemar (U.C); y analizados los gases productos de la combustión (P.C) contenían 12% de oxígeno libre, análisis seco.

PREGUNTAS

1. Los requerimientos de aire teórico, en pies cúbicos por libra de carbón.
2. El volumen de aire realmente utilizado y el porcentaje de aire en exceso.
3. La composición (%) de los productos de combustión totales, análisis húmedo.

SOLUCION

1.

Elementos combustibles = C y H.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Cálculo del C de la combustión:

Cenizas(100%) = R(82%) + U.C(18%)

R = 82% de las cenizas = 0,057lbs ∴

U.C = 0,057x18/82 = 0,0125lbs

$C \rightarrow CO_2$ = 0,739 – 0,0125 = 0,7165lbs

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,7265·(359/12) = 21,734 ft^3

O_2 del H = 0,048·(359/4) = 4,308 ft^3

O_2 del carbón = 0,088·(359/32) = 0,987 ft^3

O_2 para aire teórico = 21,734 + 4,308 – 0,987 = 25,055 ft^3

Aire teórico = 25.055/0,21 = 119 ft^3

Aire teórico = 119 ft^3 (6-1)

2.

La existencia de oxígeno en los productos de combustión es motivada por la presencia de aire exceso, de manera, que en base al oxígeno en los P.C (12%) podemos calcular el aire exceso:

P.C(secos) = CO_2 + N_2(sin aire exceso) + Aire exceso

CO_2 = O_2 del C = 21,734 ft^3

N_2(teórico) = 119x0,79 = 94,01 ft^3

N_2(carbón) = 0,014·(359/28) = 0,179 ft^3

N_2(total) sin el del aire exceso = 94,01+0,179 = 94,189 ft^3

P.C secos sin aire exceso = 21,734+94,189 = 115,923 ft^3

O_2 = 12% de los P.C secos

Aire exceso en los P.C secos = 12/0,21 = 57,14%

P.C secos sin aire exceso = 100 – 57,14 = 42,86%

Aire exceso = 116·(57,14/42,86) = 155 ft^3

Aire total = 155 + 119 = 274 ft^3

Aire total utilizado = 274 ft^3 (6-2)

Aire exceso = 100·(155/119) = 130

Aire exceso = 130% (6-2)

3.

P.C(húmedos) = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

H_2O = 2x4,308 + 0,054x(359/18) = 9,693 ft^3

N_2 total = 274x0,79 + 0,179 = 216,639 ft^3

O_2(exceso) = 155x0,21 = 32,55 ft^3

Análisis de Productos de combustión húmedos (6-3)

	Volumen (ft^3)	Porcentaje
CO_2	21,734	7,7
H_2O	9,693	3,4
N_2	216,639	77,3
O_2	35,55	11,6
	280,616	100.0

EJERCICIO N°7 (7)

Un carbón presenta el siguiente análisis:

C	53,76%	N	0,76%
H	4,44	H_2O	2,73
O	12,54	R	21,76
S	4,01		

Este carbón es quemado en un horno, usando 40% de aire en exceso. Las cenizas del horno tienen 25% de carbono sin quemar (U.C).

La temperatura del aire es de 18°C y su presión barométrica de 740 mm; asumir el aire seco.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire teóricamente requerido para quemar 1 kilogramo de carbón, a condiciones normales.

2. El volumen del aire realmente utilizado, a condiciones dadas.

3. La composición, (%), de los productos de combustión.

4. Los gramos de la humedad llevada por cada metro cúbico de los productos de combustión.

SOLUCION

1.

Los elementos combustible son: C, H y S.

Reacciones de combustión:

(1) $C + O_2 = CO_2$

(2) $2H_2 + O_2 = 2H_2O$

(3) $S + O_2 = SO_2$ Determinamos el carbono que reacciona:

Cenizas (100%) = R (75%) + U.C (25%)

Como R = 0,2176 Kg., entonces

U.C = 0,2176·(25/75) = 0,0725 Kg.

C que reacciona = 0,5376 – 0,0725 = 0,4651 Kg.

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,4651·(22,4/12) = 0,868 m^3

O_2 del H = 0,0444·(22,4/4) = 0,249 m^3

O_2 del S = 0,0401·(22,4/32) = 0,0281 m^3

O_2 del carbón = 0,1254·(22,4/32) = 0,0878 m^3

O_2(aire teórico) = 0,868 + 0,249 + 0,0281 – 0,0878 = 1,0573 m^3

Aire teórico = 1,0573/0,21 = 5,04 m^3

Aire teórico (C.N) = 5,04 m^3 (7-1)

2.

Aire total a C.N = 5,04x1,4 = 7,056 m^3

Este volumen se debe llevar a las condiciones dadas:

P_1 = 760 mm P_2 = 740 mm

T_1 = 273K T_2 = 18+273 = 291K

V_1 = 7,056 m^3 V_2 =?

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) = 7,72\ m^3$$

Volumen total del aire a condiciones dadas = 7,72 m^3 (7-2)

3.

Los productos de combustión (P.C), están compuestos así:

P.C = $CO_2 + SO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

CO_2 = O_2 del C = 0,868 m^3

H_2O = H_2O(reacciones) + H_2O(carbón)

H_2O = 0,249x2 + 0,0273·(22,4/18) = 0,532 m^3

SO_2 = O_2 del S = 0,0281 m^3

N_2 = N_2(aire) + N_2(carbón)

N_2 = 7,056x0,79 + 0,0076·(22,4/28) = 5,580 m^3

O_2(aire exceso) = (7,056 – 5,04)x0,21 = 0,423 m^3

Composición de los P.C (7-3)

Gas	Volumen (m^3)	Porcentaje
CO_2	0,868	11,68
H_2O	0,532	7,16
SO_2	0,0281	0,38
O_2	0,423	5,69
N_2	5,580	75,09
	7,431	100,00

4.

P.C secos = 7,431 – 0,532 = 6,899 m^3

Humedad = 0,532·(18/22,4) = 0,4275 Kg. = 427,5 g.

Humedad en gases secos = 427,5/6,899 = 61,97

Humedad en gases secos = 61,97 g/m^3 de gas (7-4)

Humedad en gases húmedos = 427,5/7,431 = 57,53

Humedad en gases húmedos = 57,53 g/m^3 de gas (7-4)

EJERCICIO N°8 (7)

Un horno para aceros open-hearth, es calentado con un gas producido que analizó lo siguiente:

CO	24,4%	CH_4	4,0%
CO_2	4,9	N_2	53,7
H_2	10,2	H_2O	2,8

En la combustión se utilizó 10% de aire en exceso.

El aire y el gas entran a las puertas del horno a una temperatura de 500°C y 800 mm de presión.

Los productos de combustión (P.C) salen del horno a 1500°C y 750 mm de presión

PREGUNTAS

1. Por metro cúbico de gas a C.N, los metros cúbicos de aire utilizado.
2. Por pie cúbico de gas a condiciones dadas, los pies cúbicos de aire utilizado a condiciones dadas.
3. Por pie cúbico de gas a condiciones dadas, los pies cúbicos de aire medido a condiciones normales.
4. Por metro cúbico de gas a C.N, los metros cúbicos de productos de combustión (P C) a C.N; y su composición en %.
5. por metro cúbico de gas a C.N, los metros cúbicos del total de los productos de combustión, medidos a las condiciones bajo las cuales salen del horno.
6. Por pie cúbico de gas a condiciones dadas, el total de metros cúbicos de productos de combustión tal como salen del horno.

SOLUCION

1.

Los gases combustibles son: CO, H_2 y CH_4.

Reacciones de combustión:

(1) $CO + ½ O_2 = CO_2$

(2) $H_2 + ½ O_2 = H_2O$

(3) $CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2H_2O$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del CO(1) = 0,244·(1/2) = 0,122 m^3

O_2 del H_2(2) = 0,102·(1/2) = 0,051 m^3

O_2 del CH_4(3) = 0,04x2 = 0,08 m^3

O_2(aire teórico) = 0,122+0,051+0,08 = 0,253 m^3

Aire teórico = 0,253/0.21 = 1,205 m^3

Aire total = 1,205x1,1 = 1,3255 m^3.

Aire total a C.N = 1,3255 m^3 (8-1)

2.

Vamos a partir de 1 ft^3 de gas a C.N y llevaremos uno por uno los componentes a las condiciones dadas, para ver si cambia la composición, utilizando la ecuación de los gases ideales:

$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2)$:

P_1 = 760 mm $\quad$ P_2 = 800 mm

T_1 = 273K $\quad$ T_2 = 273+500 = 773K

V_1= del compuesto (ft^3) $\quad$ V_2 =?

Calculando V_2 por sustitución en la ecuación, da los siguientes resultados:

Para el CO = 0,6563 ft^3 = 24,4%

Para el CO_2= 0,1318 ft^3 = 4,9%

Para el H_2 = 0,2744 ft^3 = 10,2%

Para el CH_4=0,1976 ft^3 = 4,0%

Para el N_2 = 1,4445 ft^3 = 53,7%

Para el H_2O=0,0753 ft^3 = 2,8%

2,6899 ft^3 100,0%

Como puede verse, la composición del gas sigue igual. Al mismo valor total llegaríamos así; asumiendo directamente 1 ft^3 de gas a C.N:

$$V_2 = 1\cdot(760/273)\cdot(773/800) = 2{,}6899\ ft^3$$

Lo anterior quiere decir, que como las proporciones o composición de 1 ft^3 de gas a C.N son iguales en condiciones dadas, el resultado será el mismo, en valor numérico que en la respuesta #1.

Aire utilizado a C.D = 1,3255 ft^3 (8-2)

3.

1 ft^3 de gas a C.D produce 1,3255 ft^3 de aire a C.D. Este aire lo llevamos a C.N:

$$V_1 = 1{,}3255\cdot(273/760)\cdot(800/773) = 0{,}49\ ft^3$$

Aire a C.N = 0,49 ft^3 por ft^3 de gas a C.D (8-3)

4.

P.C = $CO_2 + N_2 + H_2O + O_2$

$CO_2 = CO_2$ (combustible + reacción 1 + reacción 3)

$$CO_2 = 0{,}049 + 0{,}244 + 0{,}04 = 0{,}333\ m^3$$

$N_2 = N_2$(combustible + aire)

$$N_2 = 0{,}537 + 1{,}32x0{,}79 = 1{,}580\ m^3$$

$H_2O = H_2O$ (combustible + reacción 2 + reacción 3)

$$H_2O = 0{,}028 + 0{,}102 + 0{,}08 = 0{,}210\ m^3$$

$$O_2\ (\text{aire exceso}) = (1{,}3255 - 1{,}205)x0{,}21 = 0{,}025\ m^3$$

Volumen y composición de los P.C a C.N (8-4)

Gas	Volumen (m^3)	Porcentajes
CO_2	0,333	15,5
N_2	1,580	73,6
H_2O	0,210	9,8
O_2	0,025	1,2
	2,148	100,0

5.

En este caso :

$P_1 = 760$ mm　　$P_2 = 750$ mm

$T_1 = 273K$　　$T_2 = 1500+273 = 1773K$

$V_1 = 2{,}148\ m^3$　　$V_2 = ?$

$$V_2 = 2{,}148\cdot(760/273)\cdot(1773/750) = 14{,}14\ m^3$$

P.C a condiciones dadas = 14,14 m^3 (8-5)

6.

Productos de combustión a C,D, por ft^3 de gas:

$$CO_2 = 0{,}049+0{,}244+0{,}04 = 0{,}333\ ft^3$$
$$H_2O = 0{,}028+0{,}102+2x0{,}04 = 0{,}210\ ft^3$$
$$N_2 = 0{,}537+1{,}32x0{,}79 = 1{,}580\ ft^3$$
$$O_2 = 0{,}21\cdot(1{,}3255-1{,}205) = 0{,}025\ ft^3$$
$$\text{Total P.C} = 2{,}148\ ft^3$$

En este caso:

$P_1 = 800$ mm　　$P_2 = 750$ mm

$T_1 = 773K$　　$T_2 = 1773K$

$V_1 = 2{,}148\ ft^3$　　$V_2 = ?$

$$V_2 = 2{,}148\cdot(800/773)\cdot(1773/750) = 5{,}255\ ft^3$$
$$1\ ft^3 = 0{,}0283\ m^3$$
$$V_2 = 0{,}149\ m^3$$

P.C a condiciones de salida del horno, por ft^3 de gas a C.D = 0,149 m^3 (8-6)

EJERCICIO N°9 (7)

Una planta para zinc utiliza gas natural como combustible. El gas sale de las tuberías a 20°C y 940 mm de presión. El aire exterior está a –10°C, 720 mm de presión y es precalentado a 500°C antes de utilizarlo.

La composición del gas es la siguiente:

CH_4	94,2%	CO	0,8%
C_2H_4	0,8	CO_2	0,4
O_2	0,6	N_2	3,2

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de aire utilizado para quemar 1 ft^3 de gas, permitiendo un 10% de exceso y midiendo el gas a las condiciones como se obtiene de las tuberías, y el aire a las condiciones exteriores.

2. La pregunta anterior, pero con el aire medido como precalentado.

3. Los productos de combustión (P.C), a condiciones normales por pié cúbico de gas a C.N.

4. Los productos de combustión a C.N, por pié cúbico de gas bajo las condiciones como se obtiene.

SOLUCION

1.

$1\ ft^3 = 0{,}02832\ m^3$

Gases combustibles en el gas de tuberías: CH_4, C_2H_4 y CO.

Reacciones:

(1) $CH_4 + 2\ O_2 = CO_2 + 2H_2O$

(2) $C_2H_4 + 3\ O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$

(3) $CO + \frac{1}{2}\ O_2 = CO_2$ Cálculo de O_2 del aire:

O_2 del $CH_4 = 2CH_4 = 2x0{,}942 = 1{,}884\ ft^3$

O_2 del $C_2H_4 = 3C_2H_4 = 3x0{,}008 = 0{,}024\ ft^3$

O_2 del $CO = \frac{1}{2}\ CO = 1/2x0{,}008 = 0{,}004\ ft^3$

O_2 del gas $= 0{,}006\ ft^3$

O_2 teórico $= 1{,}884 + 0{,}024 + 0{,}004 - 0{,}006 = 1{,}906\ ft^3$

Aire teórico $= 1{,}906/0{,}21 = 9{,}07\ ft^3$

Aire total $= 9{,}07x1{,}1 = 9{,}977\ ft^3$

Aire total $= 9{,}977\ ft^3x0{,}028 = 0{,}279356\ m^3$

Como se dice que el gas hay que tratarlo bajo las condiciones en que sale de las tuberías, el cálculo del aire que acabamos de hacer es también bajo las mismas condiciones; pero se nos advierte que hay que considerarlo a las condiciones del medio exterior, por tanto habrá que llevarlo a esas condiciones.

$P_1 = 940$ mm $\quad P_2 = 720$ mm

$T_1 = 20+273 = 293K \quad T_2 = 273 - 10 = 263K$

$V_1 = 9{,}977\ ft^3 \quad V_2 = ?$

$V_2 = 9{,}977 \cdot (940/293) \cdot (263/720) = 11{,}7\ ft^3$

Aire total a las condiciones externas= 11,7 ft^3 (9-1)

2.

En este caso:

$P_1 = 940$ mm $\quad P_2 = 720$ mm

$T_1 = 293K \quad T_2 = 273+500 = 773K$

$V_1 = 9{,}977 \quad V_2 = ?$

$V_2 = 9{,}977 \cdot (940/293) \cdot (773/720) = 34{,}4\ ft^3$

Aire total precalentado = 34,4 ft^3 (9-2)

3.

P.C a C.N $= CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

$CO_2 = 0{,}004 + 0{,}942 + 0{,}016 + 0{,}008 = 0{,}970\ ft^3$

$H_2O = 1{,}884 + 0{,}016 = 1{,}9\ ft^3$

$N_2 = 0{,}032 + 9{,}977x0{,}79 = 7{,}914\ ft^3$

$O_2 = 0{,}006 + (9{,}977 - 9{,}07)x0{,}21 = 0{,}197\ ft^3$

$P.C = 0{,}970 + 1{,}9 + 7{,}914 + 0{,}197 = 10{,}98\ ft^3$

Total P.C a C.N = 10,98 (9-3)

4.

Los productos de combustión a las condiciones como se obtiene el gas, serían = 10,98 ft^3, porque las proporciones no varían para 1 ft^3 de gas.

Habrá que llevarlo a C.N:

P_1 = 940 mm P_2 = 760 mm
T_1 = 293K T_2 = 273K
V_1 = 10,98 ft^3 V_2 =?
V_2 = 10.98·(940/293) · (273/760) = 12,65 ft^3

P.C a C N = 12,65 ft^3 (9-4)

EJERCICIO N°10 (7)

La composición de un combustible gaseoso es la siguiente:

H_2	40%	CO	18%
CH_4	22	O_2	1
C_2H_4	7	CO_2	3
N_2	4	H_2O	5

Para quemarlo, se suministra un 15% de aire en exceso del teóricamente requerido.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire utilizado para quemar un metro cúbico de gas.
2. Los metros cúbicos de los productos de combustión por metro cúbico de gas y su composición porcentual.
3. El peso en kilogramos de un metro cúbico de gas y de un metro cúbico de los productos de combustión.
4. El peso del aire utilizado para quemar un kilogramo de gas.
5. Los gramos de vapor de agua contenidos en un metro cúbico de gas y en un metro cúbico de los productos de combustión.

SOLUCION

1.

Los gases combustibles son: H_2, CH_4, C_2H_4 y CO.

Las reacciones con sus productos, al igual que el O_2 consumido se muestran en el siguiente cuadro, para 1 m^3 de gas quemado.

	$O_2(m^3)$	$CO_2(m^3)$	$H_2O(m^3)$
$H_2 + ½ O_2 = H_2O$	0,20	---	0,40
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,44	0,22	0.44
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,21	0,14	0,14
$CO + ½ O_2 = CO_2$	0,09	0,18	---
Totales	0,94	0,54	0,98

O_2 teórico = 0,94 – 0,01 = 0,93 m^3
Aire teórico = 0,93/0,21 = 4,43 m^3
Aire total = 4,43x1,15 = 5,09 m^3

Aire total = 5,09 m^3 por m^3 de gas (10-1)

2.

P.C = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

CO_2 total = CO_2(reacciones) + CO_2(combustible)

CO_2 total = 0,54 + 0,03 = 0,57 m^3

H_2O total = H_2O(reacciones) + H_2O(combustible)

H_2O total = 0,98 + 0,05 = 1.03 m^3

N_2 total = N_2(aire) + N_2(combustible)

N_2 total = 5,09x0,79 + 0,04 = 4,06 m^3

O_2(exceso) = (5,09 – 4,43)x0,21 = 0,14 m^3.

Los productos de combustión, por m^3 de gas son (10-2)

Gas	Volumen (m^3)	Composición (%)
CO_2	0,57	9,8
H_2O	1,03	17,8
N_2	4,06	70,0
O_2	0,14	2,4
	5,80	100.0

3.

El peso en kilogramos de 1 m^3 de gas:

$H_2 = 0,4x(2/22,4) = 0,035$ Kg.
$CH_4 = 0,22x(16/22,4) = 0,157$ Kg.
$C_2H_4 = 0,07x(28/22,4) = 0,087$ Kg.
$N_2 = 0,04x(28/22,4) = 0,05$ Kg.
$CO = 0,18x(28/22,4) = 0,225$ Kg.
$O_2 = 0,01x(32/22,4) = 0,014$ Kg.
$CO_2 = 0,03x(44/22,4) = 0,059$ Kg.
$H_2O = 0,05x(18/22,4) = 0,04$ Kg.

Peso de 1 m^3 de gas = 0,035+0,157+0,087+0,05+0,225+0,014+0,059+0,04 = 0,67 Kg.

Peso de 1 m^3 de gas = 0,67 Kg. (10-3)

El peso de los P.C:

$CO_2 = 0,098x(44/22,4) = 0,192$ Kg.
$H_2O = 0,178x(18/2,4) = 0,143$ Kg.
$N_2 = 0,7x(28/22,4) = 0,875$ Kg.
$O_2 = 0,024x(32/22,4) = 0,034$ Kg.

Peso de 1 m^3 de P.C = 0,192+0,143+0,875+0,034 = 1,24 Kg.

Peso de 1 m^3 de productos de combustión = 1,24 Kg. (10-3)

4.

Debemos determinar que fracción de peso le corresponde a c/u de los componentes del gas, si el peso de este es 1 Kg.:

Si de 0,67 Kg. de gas, al H le corresponden 0,035 Kg., de 1 Kg. de gas cuanto le corresponc erá?

$H_2 = 0,035/0,67 = 0,052$ Kg. $\therefore$ $O = 0,052x(16/2) = 0,416$ Kg.
$CH_4 = 0,157/0,67 = 0,234$Kg. $\therefore$ $O = 0,234x(64/16) = 0,936$ Kg.
$C_2H_4 = 0,087/0,67 = 0,130$ Kg. $\therefore$ $O = 0,130x(96/28) = 0,445$ Kg.
$CO = 0,225/0,67 = 0,336$ Kg. $\therefore$ $O = 0,336x(16/28) = 0,192$ Kg.
O del gas = 0,014/0,67 = 0,021Kg.
O aire teórico = 0,416 + 0,936 + 0,445 + 0,192 – 0,021 = 1,97 Kg.
Aire teórico = 1,97/0,23 = 8,565 Kg.
Aire total = 8,565x1,15 = 9,85 Kg.

Aire necesario para quemar 1 Kg. de gas = 9,85 Kg. (10-4)

5.

H_2O el 1 m^3 de gas = 0,05x18/22,4 = 0,04 Kg.

H_2O en 1 m^3 de gas = 40 g. (10-5)

H_2O en 1 m^3 de P.C = 0,178x18/22,4 = 0,143 Kg.

H_2O en 1 m^3 de P.C = 143 g. (10-5)

EJERCICIO N°11 (7)

Un gas natural analizó lo siguiente:

CH_4	82%
H_2	4
CO	5
CO_2	7
N_2	2

El gas fluye de las tuberías a una temperatura de –8°C, presión de 820 mm; y es quemado con aire que tiene una temperatura de 30°C, presión de 735 mm.

Los productos de combustión llevan 3% de oxígeno libre.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire utilizado para quemar 1 m^3 de gas, ambos medidos a C.N, y el porcentaje de aire exceso utilizado.
2. la composición porcentual de los productos de combustión.
3. Los m^3 de aire utilizados para quemar 1 m^3 de gas, ambos medidos a las condiciones reales.
4. El peso de 1 m^3 de gas, bajo sus condiciones reales.
5. Los kilogramos de aire utilizados para quemar 1000 m^3 de gas, medido a sus condiciones reales.

SOLUCION

1.

Partimos de 1 m^3 de gas a las condiciones en que sale de las tuberías, lo llevamos a las condiciones del aire con que va a reaccionar; y luego pasamos a C.N:

Condiciones del gas	Condiciones del aire
$P_1 = 820$ mm	$P_2 = 735$ mm
$T_1 = 265K$	$T_2 = 303K$
$V_1 = 1\ m^3$	$V_2 = ?$

$$V_2 = 1\cdot(820/265)\cdot(303/735) = 1{,}276\ m^3$$

A estas condiciones, el gas quedaría distribuido así:

$CH_4 = 1{,}276x0{,}82 = 1{,}046\ m^3$
$H_2 = 1{,}276x0{,}04 = 0{,}051\ m^3$
$CO = 1{,}276x0{,}05 = 0{,}064\ m^3$
$CO_2 = 1{,}276x0{,}07 = 0{,}089\ m^3$
$N_2 = 1{,}276x0{,}02 = 0{,}026\ m^3$

Reacciones de combustión	$O_2(m^3)$	$CO_2(m^3)$	$H_2O(m^3)$
$CH_4 + 2\ O_2 = 2H_2O + CO_2$	2,0920	1,046	2,092
$H_2 + ½\ O_2 = H_2O$	0,0255	---	0,051
$CO + ½\ O_2 = CO_2$	0,0320	0,064	---
Totales	2,1495	1,110	2,143

$$\text{Aire teórico} = 2{,}1495/0{,}21 = 10{,}24\ m^3$$

Los productos de combustión tienen 3% de O_2, lo cual equivale a una cantidad de aire en exceso:

Aire exceso en P.C = 3/0,21 = 14,3%
P.C sin aire exceso = 100 – 14,3 = 85,7%
P.C sin aire exceso = $CO_2 + H_2O + N_2$(combustible+aire teórico)
$CO_2 = 1{,}11 + 0{,}089 = 1{,}199\ m^3$
$N_2 = 0{,}026 + 10{,}24x0{,}79 = 8{,}1156\ m^3$
P.C sin aire exceso = 1,199 + 2,143 + 8,1156 = 11,4576 m^3
Aire exceso = 11,4576x(14,3/85,7) = 1,912 m^3
Aire total = 10,24 + 1,912 = 12,152 m^3

Llevamos ahora este aire a C.N:

Aire = 12,152·(735/303) · (273/760) = 10,6 m^3

Aire a C.N = 10,6 m^3 (11-1)

Aire exceso = 100x(1,912/10,24) = 18,7%

Aire exceso = 18,7% (11-1)

2.

Los porcentajes de los productos de combustión se pueden calcular en cualquier estado en que se encuentre el gas (11-2)

	Volumen (m^3)	Composición (%)
O_2 = 11,4576·(3/85,7)	0,401	3,0
N_2 = 8,1156+1,912x0,79	9,626	72,0
CO_2 =	1,199	9,0
H_2O =	2,143	16,0
	13,369	100,0

3.

Este resultado se obtiene, utilizando el mismo procedimiento que se usó para la pregunta ; es decir, calculando el aire a las condiciones reales del gas y llevar luego el resultado a las condiciones del aire. Debe dar como resultado = **12,152 m³** (11-3)

4.

A las condiciones dadas, 1 mol de gas ocupa el siguiente volumen:

$$V = 22{,}4\cdot(760/273)\cdot(265/820) = 20{,}15\ m^3$$

Dado que el peso molecular no varía con la temperatura:

CH_4 = 0,82·(16/20,15) = 0,651 Kg.
H_2 = 0,04·(2/20,15) = 0,004
CO = 0,05·(28/20,15) = 0,069
CO_2 = 0,07·(44/20,15) = 0,153
N_2 = 0,02·(28/20,15) = 0,028
1 m^3 gas a C.N pesa = 0,905 Kg.

Peso de 1 m³ de gas a las condiciones reales = 0,905 Kg. (11-4)

5.

Cálculo del oxígeno:

O del CH_4 = 0,651x1000x(2x32/16) = 2604 Kg.
O del H_2 = 0,004x1000x(16/2) = 32
O del CO = 0,069x1000x(16/28)= 39,4
O teórico = 2604+32+39,4 = 2675,4 Kg.
Aire teórico = 2675,4/0,232 = 11532 Kg.
Aire total = 11532x1,187 = 13688,5 Kg.

Aire a condiciones reales = 13688,5 Kg. (1-5)

EJERCICIO N°12 (7)

Un horno quema el siguiente carbón, utilizando 60% de aire en exceso:

C	74,6%	O	8,2%
H	4,6	H_2O	5,0
N	1,3	R	6,3

Analizadas las cenizas del horno, contenían 20% de carbono sin quemar. El aire utilizado está húmedo, y lleva 22 gramos de vapor de agua por m^3 de aire seco.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire seco teóricamente requeridos por kilogramo de carbón, en condiciones normales.
2. Los metros cúbicos de aire húmedo realmente usados a condiciones normales.
3. El volumen total de los productos de combustión.
4. Si la cantidad de humedad en el aire fuera 22 gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire húmedo,¿ cual sería el volumen de aire húmedo realmente utilizado para la combustión del carbón?

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona:

Cenizas = R + U.C
100 80 20

R = 0,063 Kg. ∴

U.C = 0,063·(20/80) = 0,016 Kg.

C que reacciona = 0,746 – 0,016 = 0,73 Kg.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$

$H_2 + ½ O_2 = H_2O$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,73x22,4/12 = 1,362 m^3

O_2 del H = 0,046x22,4/4 = 0,258 m^3

O_2 del carbón = 0,082x22,4/32 = 0,0574 m^3

O_2 aire teórico = 1,362 + 0,258 – 0,057 = 1,563 m^3

Aire teórico = 1,563/0,21 = 7,44 m^3

Aire teórico = 7.44 m^3 (12-1)

2.

Aire total seco = 7,44x1,6 = 11,904 m^3

Vapor de agua = 0,022Kg./m^3 de aire seco.

Vapor de agua = 0,022x22,4/18 = 0,0273 m^3/m^3 de aire seco.

Humedad total = 11,904x0,0273 = 0,325 m^3

Aire húmedo = 11,904 + 0,325 = 12,23 m^3.

Aire total húmedo C.N = 12,23 m^3 (12-2)

3.

P.C = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$ exceso

$CO_2 = O_2$ del C = 1,362 m^3

$H_2O = H_2O$ (carbón + aire + reacciones)

H_2O = 0,05·(22,4/18) + 0,352 + 0,258x2 = 0,903 m^3

$N_2 = N_2$ (aire + carbón)

N_2 = 0,013x22,4/28 + 11,904x0,79 = 9,414 m^3

Aire exceso = 11,904 – 7,44 = 4,464 m^3

O_2 aire exceso = 4,464x0,21 = 0,937 m^3

P.C = 1,362 + 0,903 + 9,414 + 0,937 = 12,62 m^3

Productos de combustión = 12,62 m^3 (12-3)

4.

Aire húmedo = 12,23 m^3

Humedad = 12,23·(22/1000) · (22,4/18) = 0,335 m^3

Aire húmedo = 12,23 – 0,325 + 0,335 = 12,24 m^3

Aire húmedo = 12,24 m^3 (12-4)

EJERCICIO N°13 (7)

Un carbón usado para calentar un horno de reverbero analizó lo siguiente:

C	65,0%	N	2,0%
H	5,8	H_2O	4,8
•	10,2	R	12,2

Las cenizas del horno representaron el 15% del peso del carbón.

Para la combustión se suministró 75% de aire en exceso. El aire contenía 15 gramos de vapor de agua por cada metro cúbico de aire húmedo.

PREGUNTAS

1. los metros cúbicos de aire húmedo suministrados, por kilogramo de carbón.

2. Los gramos de vapor de agua contenidos en cada metro cúbico de los productos de combustión gaseosos.

SOLUCION

1.

Cálculo del carbono que reacciona:

Dado que el peso de las cenizas es 0,15 y el del residuo es 0,122 Kg. por Kg. de carbón, entonces:

R = 0,122/0,15 = 0,8133 = 81,33% de las cenizas.

Cenizas = R + U.C

U.C = 100 – 81,33 = 18,67% de las cenizas ∴

U.C = 0,15x0,1867 = 0,028 Kg.

$C \rightarrow CO_2$ = 0,65 – 0,028 = 0,622 Kg.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$

$H_2 + ½\ O_2 = H_2O$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,622·(22,4/12) = 1,161 m^3

O_2 del H = 0,058·(22,4/4) = 0,325 m^3

O_2 del carbón = 0,102·(22,4/32) = 0,0714 m^3

O_2 aire teórico = 1,161 + 0,325 – 0,0714 = 1,4146 m^3

Aire teórico seco = 1,4146/0,21 = 6,7362 m^3

Aire total seco = 6,7362x1,75 = 11,7883 m^3

Vapor de agua = 0,015·(22,4/18) = 0,0186 m^3/m^3 de aire.

Humedad del aire = 11,7883x0,0186 = 0,2193 m^3

Aire húmedo = 11,7883 + 0,2193 = 12,0076 m^3

Aire húmedo = 12,00 m^3 por Kg. de carbón (13-1)

2.

P.C = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$(exceso).

$CO_2 = O_2$ del C = 1,161 m^3

$H_2O = H_2O$ (carbón + reacción + humedad aire)

H_2O = 0,048x22,4/18 + 0,325x2 + 0,22 = 0,93 m^3

$N_2 = N_2$(carbón + aire)

N_2 = 0,02x22,4/28 + 11,7883x0,79 = 9,3288 m^3

Aire exceso seco = 11,7883 – 6,7362 = 5,0521 m^3

O_2exceso = 5,0521x0,21 = 1,0609 m^3

P.C = 1,161 + 0,93 + 9,3288 + 1,0609 = 12,4807 m^3

Vapor de agua = 0,93x18/22,4 = 0,747 Kg. = 747 g.

Vapor de agua = 747/12,4807 = 59,85

Vapor de agua = 60 g por m^3 de P.C (13-2)

EJERCICIO N°14 (7)

Un carbón bituminoso tiene la siguiente composición:

C	70,6%	N	1,4%
H	4,8	H_2O	4,6
O	8,6	R	10,0

Fue quemado con 75% de aire en exceso. Las cenizas del horno contenían 13,6% de carbono sin quemar.

El aire estaba a 15°C y 772 mm de presión barométrica; y llevaba 11,6 gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire seco, medido a condiciones normales.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire seco teóricamente requerido por kilogramo de carbón, medido a condiciones dadas.

2. El volumen de aire húmedo realmente utilizado, y el porcentaje de humedad.

3. El volumen de los productos de combustión, tal como ellos salen por la chimenea a la temperatura de 420°C.

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona:

Cenizas = R + U.C

100   86,4 +13,6 ∴

U.C = 0,1·(13,6/86,4) = 0,016 Kg.

$C \rightarrow CO_2$ = 0,706 – 0,016 = 0,69 Kg.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$

$H_2 + ½\ O_2 = H_2O$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,69·(22,4/12) = 1,288 m^3

O_2 del H = 0,048·(22,4/4) = 0,267 m^3

O_2 del carbón = 0,086·(22,4/32) = 0,0602 m^3

O_2 aire teórico = 1,288 + 0,267 – 0,06 = 1,495 m^3

Aire teórico a C.N = 1,495/0,21 = 7,119 m^3

Cambio a condiciones dadas:

$P_1 = 760$ mm $\quad P_2 = 772$ mm
$T_1 = 273K \quad T_2 = 288K$
$V_1 = 7{,}119\ m^3 \quad V_2 = ?$
$V_2 = 7.119\cdot(760/273)\cdot(288/772) = 7{,}4\ m^3$

Aire teórico a C.D = 7,40 m³ (14-1)

2.

Aire total seco (C.D) = 7,4x1,75 = 12,95 m^3
Humedad = 0,0116·(22,4/18) = 0,0144 m^3/m^3 aire seco
Total aire seco C.N = 7,12x1,75 = 12,46 m^3
Humedad total = 12,46x0,0144 = 0,18 m^3

Volumen aire húmedo realmente usado = 12,95 + 0,18 = 13,13 m^3

Aire realmente usado C.D =13,13 m³ (14-2)

Máxima presión de saturación de vapor de agua a 15°C (tablas) = 12,8 mm
A esta le corresponde un volumen de

$V(H_2O) = 12{,}46x12.8 /(772-12{,}8) = 0{,}21\ m^3$
Saturación = 100·(0,18/0,21) = 85,7%

Porcentaje de humedad = Saturación = 85,7% (14-2)

3.

P.C = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$(exceso)
$CO_2 = O_2$ del C = 1,288 m^3
$H_2O = H_2O$ (carbón + reacción + humedad aire)
$H_2O = 0{,}046\cdot(22{,}4/18) + 0{,}267x2 + 0{,}18 = 0{,}771\ m^3$
$N_2 = N_2$(carbón + aire)
$N_2 = 0{,}014\cdot(22{,}4/28) + 12{,}46x0{,}79 = 9{,}8546\ m^3$
Aire exceso = 12,46 – 7,119 = 5,431 m^3
O_2(aire exceso) = 5,341x0,21 = 1,122 m^3
Total P.C = 1,288+0,771+9,8546+1,122 = 13,0356 m^3

Pasamos a las condiciones de salida de los gases por la chimenea:

$P_1 = 760$ mm $\quad P_2 = 772$ mm
$T_1 = 273K \quad T_2 = 693K$
$V_1 = 13{,}0356\ m^3 \quad V_2 = ?$
$V_2 = 13{,}0356\cdot(760/273)\cdot(693/772) = 32{,}6\ m^3$

P.C tal como salen por la chimenea = 32,6 m³ (14-3)

EJERCICIO N°15 (7)

El análisis de un carbón es el siguiente:

C	72,4%	O	10,0%
N	1,8	H_2O	2,4
H	6,4	R	7,0

Cuando este carbón fue quemado en un horno, utilizando 80% de aire en exceso; Las cenizas promediaron 15% de carbono sin quemar.

El aire para la combustión llevó 12 mm de vapor de agua, siendo la presión barométrica de 720 mm.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado (incluyendo el contenido de humedad), por kilogramo de carbón quemado.
2. El volumen y composición (%), de los productos de combustión.
3. El peso del aire húmedo y el peso total de los productos de combustión, cuyos volúmenes fueron determinados en las respuestas 1 y 2.

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona:
Cenizas = R + U.C
100 $\quad$ 85 + 15 ∴
U.C = 0,07·(15/85) = 0,0124 Kg.

$C \rightarrow CO_2 = 0{,}724 - 0{,}0124 = 0{,}712$ Kg.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$

$2H_2 + O_2 = 2H_2O$

Cálculo del O_2 del aire teórico seco:

O_2 del C = 0,712·(22,4/12) = 1,329 m^3

O_2 del H = 0,064·(22,4/4) = 0,3584 m^3

O_2 del combustible = 0,1·(22,4/32) = 0,07 m^3

O_2(aire teórico seco) = 1,329 + 0,3584 – 0,07 = 1,6174 m^3

Aire teórico seco = 1,76174/0,21 = 7,7 m^3

Total aire seco a C.N = 7,7x1,8 = 13,86 m^3

Cálculo del volumen de la humedad:

Los volúmenes y las presiones siempre están en la misma relación en la mezcla:

$P_1/P_2 = V_1/V_2 \therefore$

$V_2 = V_1 \cdot (P_2/P_1)$

V_1 = volumen de aire seco = 13,86 m^3

P_1 = presión de aire seco = 720 – 12 = 708 mm

V_2 = volumen de humedad =?

P_2 = presión de la humedad = 12 mm

V_2 = 13,86·(12/708) = 0,23 m^3

Volumen total de aire húmedo = 13,86 + 0,23 = 14,09 m^3

Aire total húmedo = 14,09 m^3 (15-1)

2.

P C = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$(aire exceso)

$CO_2 = O_2$ del C = 1,329 m^3

$H_2O = H_2O$ (combustible + reacción + humedad aire)

H_2O = 0,23 + 2x0,3584 +0,024·(22,4/18) = 0,95 m^3

$N_2 = N_2$ (carbón + aire)

N_2 = 0,018 ·(22,4/28) + 13,89x0.79 = 10,964 m^3

Aire exceso seco = 13,86 – 7,7 = 6,16 m^3

O_2 (aire exceso) = 6,16x0,21 = 1,29 m^3

Productos de combustión (15-2)

Gas	Volumen (m^3)	Composición (%)
CO_2	1,33	9,1
H_2O	0,95	6,6
N_2	10,97	75,4
O_2	1,29	8,9
	14,94	100,0

3.

Densidad del aire = 1,293 Kg/m^3

Peso del aire seco = 13,86x1,293 = 17,92 Kg.

Un m^3 de vapor de agua pesa 0,8063 Kg.

Peso del vapor de agua = 0,23x0,8063 = 0,19 Kg.

Peso del aire húmedo = 17,92 + 0,19 = 18,11 Kg.

Peso de aire húmedo = 18,11 Kg. (15-3)

Densidad del CO_2 = 1,977 Kg./m^3

Peso del CO_2 = 1,977x1,33 = 2,63 Kg.

Densidad del N_2 = 1,251

Peso del N_2 = 1,291x10,97 = 14,16 Kg.

Densidad del O_2 = 1,429

Peso del O_2 = 1,429x1,29 = 1,84 Kg.

Peso total del agua = 0,95x0,8063 = 0,77 Kg.

Peso total de los P.C = 2,63+14,16+1,84+0,77 = 19,40 Kg.

Total P.C = 19,40 Kg. (15-3)

EJERCICIO N°16 (7)

Un carbón de Pennsylvania presentó la siguiente composición:

C	80,3%	N	1,5%
H	4,9	H_2O	2,0
O	3,1	R	8,2

Cuando se usó este carbón en un horno, las cenizas totalizaron el 12,2% del peso del carbón.

Se utilizó 30% de aire en exceso, y es aire estaba ¾ saturado con vapor de agua. La temperatura del aire fue de 15°C y el barómetro marcó 740 mm de presión.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de aire utilizado, medidos a C.N por libra de carbón.
2. Los pies cúbicos de aire utilizados bajo las condiciones reales.
3. El volumen de los productos de combustión y los granos de humedad llevada en ellos, por pie cúbico.

SOLUCION

1.

Cálculo del carbono que reacciona:

Cenizas = R + U.C

U.C = cenizas – R = 0,121 – 0,082 = 0,039 lbs.

$C \rightarrow CO_2$ = 0,803 – 0,039 = 0,764 lbs.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$

$2H_2 + O_2 = 2H_2O$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,764·(359/12) =22,856 ft^3

O_2 del H = 0,049·(359/4) = 4,398 ft^3

O_2 del carbón = 0,031·(359/32) = 0,348 ft^3

O_2(aire teórico) = 22,856 + 4,398 – 0.348 = 26,906 ft^3

Aire teórico seco = 26,906/0,21 = 128,1 ft^3

Aire total seco a C.N = 128,1x1,3 = 166 ft^3

Aire total seco a C.N = 166 ft^3 (16-1)

2.

Saturación del aire = ¾ = 75%

Presión máxima de vapor de agua a 15°C (tablas XXIV del Apéndice) = 12,8 mm

Presión real del vapor de agua = 12,8x0,75 = 9,6 mm

Barómetro = 740 mm

Vamos a llevar el aire a las condiciones reales:

P_1 = 760 mm P_2 = 740 – 9,6 = 730,4 mm

T_1 = 273K T_2 = 273+15 = 288K

V_1 = 166 ft^3 V_2 =?

$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2)$ = 182 ft^3

Volumen de aire a las condiciones reales = 182 ft^3 (16-2)

3.

P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2(aire exceso)

CO_2 = O_2 del C = 22,856 ft^3

H_2O = H_2O(carbón + reacción + humedad del aire)

H_2O = 0,02·(359/18) + 2x4,398 + 166·(9,6/730,4) = 11,376 ft^3

N_2 = N_2(carbón + aire)

N_2 = 0,015·(359/28) + 166x0,79 = 131,332 ft^3

Aire exceso = 166 – 128 = 38 ft^3

O_2(aire exceso) = 38x0,21 = 7,98 ft^3

P.C = 22,856+11,376+131,332+7,98 = 174 ft^3

Productos de combustión = 174 ft^3 (16-3)

Humedad en los P.C = 11,376 ft^3

1 grano = 0,000143 libras = 0,0648 gramos
1 m^3 de agua pesa 0,8063 Kg.

$H_2O = 11{,}376x0{,}028 = 0{,}32\ m^3$

$H_2O = 0{,}32x0{,}8063 = 0{,}258$ Kg. = 258 g.

$H_2O = 258/0{,}0648 = 3981$ granos

Humedad en P.C = 3981/174 = 23 granos/ft^3

Humedad en P.C = 23 granos/ft^3 (16-3)

EJERCICIO N°17 (7)

Un carbón bituminoso utilizado en un horno de reverbero, analizó lo siguiente:

C	75,4%	N	1,6%
H	6,6	H_2O	2,0
O	7,2	R	6,4
S	0,8		

Este carbón fue quemado en un horno con 60% de aire en exceso. 4% del carbono contenido en el carbón se perdió sin quemar en las cenizas.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire teórico requeridos por kilogramo de carbón, medidos a condiciones normales.
2. Los metros cúbicos de aire húmedo utilizados, si este estuviera ½ saturado con vapor de agua a 22°C y 740 mm de presión.
3. Los metros cúbicos de productos de combustión formados en este caso.
4. La composición (%) de los productos de combustión.
5. La presión parcial del vapor de agua en los productos de combustión.

SOLUCION

1.

En esta oportunidad el U.C no viene vinculado ni a las cenizas ni al residuo, sino directamente al C del combustible.

U.C = 0,724x0,04 = 0,0302 Kg.

$C \rightarrow CO_2 = 0{,}724 - 0{,}030 = 0{,}724$ Kg.

Los elementos combustibles son: C, H y S.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$

$2H_2 + O_2 = 2H_2O$

$S + O_2 = SO_2$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,724·(22,4/12) = 1,351 m^3

O_2 del H = 0,066·(22,4/4) = 0,3696 m^3

O_2 del S = 0,008·(22,4/32) = 0,0056 m^3

O_2 del carbón = 0,072·(22,4/32) = 0,0504 m^3

O_2(aire teórico) = 1,351 + 0,3696 + 0,0056 – 0,0504 = 1,6758 m^3

Aire teórico = 1,6758/0,21 = 7,98 m^3

Aire teórico (C.N) = 7,98 m^3 por Kg. de carbón (17-1)

2.

Saturación = ½ =50%

Máxima presión de vapor de agua a 22°C (tablas XXIV del Apéndice) = 19,8 mm

Presión real del vapor de agua = 19,8x0,5 = 9,9 mm.

Aire seco total = 7,98x1,6 = 12,77 m^3

Presión de aire seco = 740-9,9 = 730,1 mm.

Cambiamos a las condiciones dadas:

V_2 = Volumen de aire húmedo

V_1 = Volumen de aire seco = 12,77 m^3

P_2 = presión de aire húmedo = 760 mm

P_1 = presión de aire seco = 730,1 mm
T_2 = 273K
T_1 = 295K
$V_2 = 12,77\cdot(760/273).(295/730,1) = 14,36\ m^3$

Aire húmedo a C.D = 14,36 m³ (17-2)

También se puede realizar el cálculo así:
En una mezcla de gases, las presiones parciales guardan la misma relación que los volúmenes:
$V_2/V_1 = P_2/P_1$ ∴
$V_2 = V_1\cdot(P_2/P_1)$

V_2 = volumen de humedad =?
V_1 = volumen de aire seco = 12,77 m^3
P_2 = presión parcial del agua = 9,9 mm
P_1 = presión parcial del aire seco = 740 – 9,9 = 730,1 mm
$V_2 = 12,77\cdot(9,9/730,1) = 0,173\ m^3$

Pasamos el aire seco a C.D:
$V_2 = 12,77\cdot(760/173)\cdot(295/740) = 14,172\ m^3$
Aire húmedo = 14,172 + 0,173 = 14,35 m^3

Aire húmedo a C.D = 14,35 m³ (17-2)

3.
$P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$
$CO_2 = O_2$ del C = 1,351 m^3
$H_2O = H_2$= (carbón + reacción + humedad aire)
$H_2O = 0,02x22,4/18 + 2x0,3696 + 0,173 = 0,9372\ m^3$
$N_2 = N_2$(carbón + aire)
$N_2 = 0,016x22,4/28 + 12,77x0,79 = 10,1011\ m^3$
$SO_2 = O_2$ del S = 0,0056 m^3
Aire exceso = 12,77 – 7,98 = 4,79 m^3
O_2(aire exceso) = 4,79x0,21 = 1,0059 m^3
P.C = 1,351 + 0,9372 + 10,1011 + 0,0056 + 1,0059 = 13,40 m^3

Productos de combustión = 13,40 m³ (17-3)

4.
Composición de los productos de combustión (17-4)

Gas	Volumen (m^3)	Composición (%)
CO_2	1,351	10,1
H_2O	0,9372	7,0
N_2	10,1011	75,4
O_2	1,0059	7,5
SO_2	0,0056	0,04

5.
$P_i = X_iP$

P_i = presión parcial del componente "i"
X_i = fracción molar de "i" = 0,07 (ver composición)
P = presión total de la mezcla = 740 mm
$P_i = 0,07x740 = 51,8$ mm

Presión del vapor de agua en los P.C = 51,8 mm (17.5)

EJERCICIO N°18 (7)

Un horno para fusión de aluminio utilizó coque como combustible. La composición del coque fue la siguiente:

C	85%
H	1
H_2O	2
R	12

1/5 de las cenizas del horno eran carbono sin quemar.

Por cada kilogramo de coque se utilizaron 12 m^3 de aire húmedo, medido a condiciones normales; llevando 20 mm de vapor de agua. Barómetro, 720 mm.

PREGUNTAS

1. El porcentaje de aire exceso utilizado.

2. El volumen total de los productos de combustión (húmedos), y el porcentaje de oxígeno libre en ellos.

Si los productos de combustión hubieran contenido 6% de oxígeno libre, análisis seco, ¿qué porcentaje de aire en exceso significaría esto?.

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona:

Cenizas = R + U.C

5/5 4/5 1/5

100% 80% 20%

$U.C = 0{,}12\cdot(20/80) = 0{,}03$ Kg.

$C \rightarrow CO_2 = 0{,}85 - 0{,}3 = 0{,}82$ Kg.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del $C = 0{,}82x22{,}4/12 = 1{,}53\ m^3$

O_2 del $H = 0{,}01x22{,}4/4 = 0{,}056\ m^3$

O_2(aire teórico) $= 1{,}53 + 0{,}056 = 1{,}586\ m^3$

Aire teórico $= 1{,}586/0{,}21 = 7{,}552\ m^3$

Humedad $= 12\cdot(20/720) = 0{,}34\ m^3$

Aire total seco $= 12 - 0{,}34 = 11{,}66\ m^3$

Aire exceso $= 11{,}66 - 7{,}55 = 4{,}11\ m^3$

Aire exceso $= 4{,}11x100/7{,}55 = 54{,}4\%$

Aire exceso = 54,4 % (18-1)

2.

$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

$CO_2 = O_2$ del $C = 1{,}53\ m^3$

$H_2O = H_2O$ (carbón + reacción + humedad aire)

$H_2O = 0{,}02\cdot(22{,}4/18) + 2x0{,}056 + 0{,}34 = 0{,}48\ m^3$

$N_2 = 11{,}66x0{,}79 = 9{,}211\ m^3$

O_2(aire exceso) $= 4{,}11x0{,}21 = 0{,}863\ m^3$

Total $P.C = 1{,}53 + 0{,}48 + 9{,}211 + 0{,}863 = 12{,}08\ m^3$

Total P.C húmedos = 12,08 m^3 (18-2)

$O_2 = 0{,}863/12{,}08 = 0{,}0714$

O_2 libre en P.C húmedos = 7,14% (18-2)

3.

Nos piden calcular con análisis seco:

P.C sin aire exceso ni agua $= 12{,}08 - 4{,}11 - 0{,}48 = 7{,}49\ m^3$

N_2 del aire exceso en $P.C = 6\cdot(79/21) = 22{,}57\%$

Aire exceso en $P.C = 22{,}57 + 6 = 28{,}57\ \%$

P.C secos sin aire exceso $= 100 - 28{,}57 = 71{,}43\%$

$71{,}34\% = 7{,}49m^3\ \therefore$

Aire exceso $= 7{,}49\cdot(28{,}57/71{,}43) = 1{,}9958\ m^3$

Aire exceso $= 100\cdot(2{,}9958/7{,}55) = 39{,}6$

Aire exceso = 39,6% (18-3)

EJERCICION Nº19 (7)

Los productos de combustión de un horno que quemó carbón pulverizado, fueron analizados y se encontró que contenían 5,7% de oxígeno libre, análisis seco. La composición del carbón era la siguiente:

C	73,6%	N	1,7%
H	5,3	H_2O	1,4
O	10,0	R	8,0

Las condiciones atmosféricas fueron: temperatura, 52°F; barómetro, 28,9 in; humedad, 68%.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire seco, en pies cúbicos a condiciones normales, teóricamente requerido por libra de carbón.
2. El porcentaje del aire en exceso.
3. El volumen de aire húmedo realmente utilizado por libra de carbón, medido a las condiciones dadas.
4. Los granos de humedad llevados por pie cúbico de los productos de combustión, y la presión parcial del vapor de agua en los gases.

SOLUCION

1.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$

$2H_2 + O_2 = 2H_2O$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,736·(359/12) = 22,019 ft^3

O_2 del H = 0,053·(359/4) = 4,756 ft^3

O_2 del carbón = 0,1·(359/32) = 1,122 ft^3

O_2(aire teórico) = 22,019 + 4,756 – 1,122 = 25,653 ft^3

Aire teórico = 25,653/0,21 = 122,1 ft^3

Aire teórico seco a C.N = 122,1 ft^3 (19-1)

2.

Este cálculo lo realizaremos sobre la base del oxígeno libre en los P.C:

P.C = CO_2 + H_2O + N_2(aire teórico+carbón) + Aire exceso):

CO_2 = O_2 del C = 22,019 ft^3

N_2(A.teórico + carbón) = 0,017·(359/28) +122,1x0,79 = 96,677 ft^3

P.C secos sin aire exceso = 22,019 + 96,677 = 118,696 ft^3

N_2 (aire exceso), en P.C secos = 5,7·(79/21) = 21,4%

Aire exceso en P.C secos = 5,7 + 21,4 = 27,10%

P.C secos sin aire exceso = 100-27,10 = 72,9% = 118,696 ft^3

Aire exceso = 118,696·(27,10/72,90) = 44,114 ft^3

Aire exceso = 44,114/122,1 = 0,361

Aire exceso = 36,1% (19-2)

3.

Total aire seco = 122,1 + 44,114 = 166,2 ft^3 (C.N)

T = 52°F = (5/9)x(52-32) = 11°C

Máxima presión de vapor de agua a 11°C = 9,8 mm (tablas XXIV del Apéndice)

Presión real del vapor de agua = 0,68x9,8 = 6,7 mm

Cálculo del aire húmedo:

P_1 = 760 mm	P_2 = 734 – 6,7 = 727 mm
T_1 = 273K	T_2 = 273+11 = 284K
V_1 = 166,2 ft^3	V_2 =?

V_2 = 166,2·(760/273) ·(284/727) = 180,7 ft^3

Aire húmedo a C.D = 180,7 ft^3 (19-3)

4.

P.C secos = 118,696 + 44,114 = 162,81 ft^3

H_2O en P.C = H_2O (carbón+reacción +humedad)

H_2O en P.C = 0,014x359/18 + 2x4,756 + 166,2·(6.7/727,3) = 11,319 ft^3

P.C húmedos = 162,81 + 11,319 = 174,102 ft^3

1 grano = 0,0648 gramos = 0,000143 lbs.

H_2O total = 11.319x0,028 = 0,317 m^3

$H_2O = 0{,}8063x0{,}317 = 0{,}256Kg = 256$ g.

$H_2O = 256g\cdot(1$ grano$/0{,}0648$ g$) = 3951$ granos

$H_2O = 3951/174{,}102 = 22{,}7$ gr./ft^3

H_2O = 22,7 gr./ft^3 de P.C húmedos (19-1)

Fracción de agua en los P.C = 11,319/174,102 = 0,065

Presión parcial de $H_2O = 0{,}065x28{,}9 = 1{,}89$ in.

Presión parcial del vapor de agua en P.C = 1,89 in (19-4)

EJERCICIO N°20 (7)

Un carbón analizó lo siguiente:

C	67,5%	N	1,0%
H	4,9	H_2O	2,8
O	9,3	R	14,5

Cuando fue quemado en un horno, los productos de combustión fueron analizados y se encontró que contenían 11,5% de CO_2, análisis seco.

Las cenizas del horno llevaron 18% de carbono sin quemar.

La temperatura del aire fue de 20°C, barómetro; 765 mm, saturado con vapor de agua.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire seco, teóricamente requeridos por kilogramo de carbón, a condiciones normales.
2. El porcentaje de aire exceso utilizado.
3. Los metros cúbicos de aire húmedo realmente utilizados, bajo las condiciones dadas.
4. Al hacer el análisis de los gases secos, cuantos gramos de humedad fueron removidos por metro cúbico de aire húmedo a C.N?

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona;

Cenizas = R + U.C

100 82 18

U.C = 0,145·(18/82) = 0,032 Kg.

$C \rightarrow CO_2 = 0{,}675 - 0{,}032 = 0{,}643$ Kg.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,643·(22,4/12) = 1,2 m^3

O_2 del H = 0,049·(22,4/4) = 0,274 m^3

O_2 del carbón = 0,093·(22,4/32) = 0,065 m^3

O_2(aire teórico) = 1,2 + 0,274 – 0,065 = 1,41 m^3

Aire teórico = 1,41/0,21 = 6,71 m^3

Aire teórico a C.N = 6,71 m^3 (20-1)

2.

P.C secos = CO_2 + N_2(carbón+aire teórico) + aire exceso.

CO_2 = 1,2 m^3

N_2 del carbón = 0,01·(22,3/28) = 0,008 m^3

N_2 del aire teórico = 6,71x0,79 = 5,3 m^3

Total N_2 sin el del aire exceso = 0,008+5,3 = 5,308 m^3

CO_2 = 11,5% de los P.C secos

P.C secos = 1,2/0,115 = 10,434 m^3

Aire exceso = 10,343 – 1,2 – 5,308 = 3,926 m^3

Aire exceso = 3,926/6,71 0 0.585

Aire exceso = 58,5% (20-2)

3.

Máxima presión de vapor a 20°C (tablas XXIV del Apéndice) = 17,5 mm

Barómetro = 765 mm

Vamos a pasar el aire seco a condiciones dadas.

Aire total seco a C.N = 6,71 + 3,926 = 10,636 m^3

P_1 = 760 mm P_2 = 765 mm
T_1 = 273K T_2 = 273+20 = 293K
V_1 = 10,636 m^3 V_2 = aire seco a C.D

V_2 = 10,636·(760/273) · (293/765) = 11,34 m^3

El aire está saturado con vapor de agua:
P_2 = presión aire seco = 765 – 17,5 = 747,5 mm
P_1 = presión de vapor de agua = 17,5 mm
V_2 = volumen aire seco = 10,636 m^3
V_1 = volumen del vapor de agua =?

V_1 = 10,636·(17,5/747,5) = 0,249 m^3
Aire húmedo C.D = 11,34 + 0,25 = 11,59 m^3

Total aire húmedo a C.D = 11,59 m^3 (20-3)

4.

Pasamos el aire húmedo a C.N:

V_1 = 11,59·(765/293) · (273/760) = 10,879 m^3
H_2O del aire a C.N = 10,879 – 10,636 = 0,243 m^3
Total H_2O en P.C = 0,243 + 2x0,274 + 0,028·(22,4/18) = 0,8258 m^3
P.C húmedos C.N = 10,434 + 0,8258 = 11,26 m^3
H_2O = 0,8258m^3·(18 Kg/22,4 m^3) · (1000 g/1 Kg.) = 663,59 g
H_2O = 663,59/11,26 = 59

H_2O removida = 59 g/m^3 de P.C húmedos. (20-4)

EJERCICIO N°21 (7)

Un horno open-hearth utilizó como combustible el gas producido en un horno para coquizar. Su análisis fue el siguiente:

H_2	44,5%	C_2H_4	3,0%
CO	6,0	C_6H_6	0,8
CO_2	3,0	N_2	8,4
CH_4	34,0	O_2	0,3

Se utilizó 20% de aire en exceso, y el aire contenía 20 gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire húmedo.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire húmedo utilizado, por metro cúbico de gas.
2. El volumen de los productos de combustión, por metro cúbico de gas.
3. Los gramos de vapor de agua contenidos en un metro cúbico de productos de combustión.

SOLUCION

1.

Componentes del gas que son combustibles: H_2, CO, CH_4, C_2H_4 y C_6H_6. Estos gases reaccionan de acuerdo a como se muestra en el cuadro siguiente:

Reacciones	O_2 + Productos/ m^3 de gas (m^3)		
	O_2	CO_2	H_2O
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0,2225	---	0,445
$CO + ½ O_2 = CO_2$	0,03	0,06	---
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,68	0,34	0,68
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,09	0,06	0,06
$C_6H_6 + 7,5 O_2 = 6CO_2 + 3H_2O$	0,06	0,048	0,024
Totales	1,0825	0,508	1,209

O_2 del aire teórico = 1,0825 – 0,003 = 1.0795 m^3
Aire teórico seco = 1,0795/0,21 = 5,1405 m^3
Aire total seco = 5,1405x1,2 = 6,1686 m^3
Humedad del aire = 0,02 Kg/m^3 de aire húmedo
Peso específico del agua = 0,8063 Kg./m^3

Humedad = 0,02/0,8063 = 0,0248 m^3/m^3 de aire húmedo
Humedad total = 6,1686x0,0248 = 0,1530 m^3
Aire húmedo = 6,1686 + 0,153 = 6,3216 m^3
Aire húmedo = 6,3216 m^3 (21-1)

2.
P.C = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$
CO_2 = 0,508 + 0,03 = 0,538 m^3
H_2O = 1,209 + 0,153 = 1,362 m^3
N_2 = 0,084 + 6,1686x0,79 = 4,9572 m^3
O_2 = (6,1686 – 5,1405) · 0,21 = 0,2159 m^3
Total P.C = 0,538 + 1,362 + 4,9572 + 0,2159 = 7,0731 m^3
Total P.C = 7,0731 m^3/m^3 de gas (21-2)

3.
H_2O = 1,362x0,8063 = 1,0982 Kg.
H_2O = 1,0982x1000/7,0731 = 155,26
H_2O = 155,26 g/m^3 de P.C (21-3)

EJERCICIO N°22 (7)

El gas subproducto de una coquizadora, fue utilizado para el calentamiento de una planta de coque y analizó lo siguiente:

CO_2	3%	C_2H_4	2%
CO	6	C_6H_6	1
CH_4	35	H_2	44
N_2	9		

Estos análisis fueron realizados después de secada la muestra, realmente la humedad del gas era de 12% de agua.

El aire contenía 3% de humedad.

Los productos de combustión de la cámara de calentamiento llevaron 2,6% de oxígeno libre, análisis seco.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire húmedo, utilizados para quemar un metro cúbico de gas húmedo.
2. El porcentaje de aire exceso utilizado.
3. El volumen de cada constituyente de los productos de combustión.
4. Los gramos de humedad contenidos en un metro cúbico de los productos de combustión.

SOLUCION

1.
Los gases combustibles son: CO, CH_4, C_2H_4, C_6H_6 y H_2.
H_2O en 1 m^3 de gas húmedo = 0,12 m^3
Gas seco = 1 – 0,12 = 0,88 m^3.

Reaccione de combustión:
$CO + ½ O_2 = CO_2$: O_2 = 0,88x0,06x0,5 = 0,0264 m^3
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2H_2O$: O_2 = 0,88x0,035x2 = 0,0616 m^3
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$: O_2 = 0,88x0,02x3 = 0,0528 m^3
$C_6H_6 + 7,5 O_2 = 6CO_2 + 3H_2O$: O_2 = 0.88x0,01x7,5 = 0,066 m^3
$H_2 + ½ O_2 = H_2O$: O_2 = 0,88x0,44x0,5 = 0,1936 m^3
O_2(aire teórico) = 0,0264+0,0616+0,0528+0,066+0.1936 = 0,9548 m^3
Aire teórico seco = 0,9548/0,21 = 4,55 m^3
P.C secos = N_2(gas) + N_2(aire teórico) + aire exceso + CO_2
Aire exceso en P.C secos = 2,6/0,21 = 12,38%
P.C secos sin aire exceso = 100 – 12,38 = 87,62%
N_2(gas) = 0,88x0,09 = 0,0792 m^3
N_2(aire teórico) = 4,55x0,79 = 3,5945 m^3
N_2 total sin aire exceso = 0,0792+3,5945 = 3,6737 m^3
CO_2 = 0,88x0,03+0,88x0,06+0,88x0,35+0,88x0,02x2+0,88x0,01x6 = 0,4752 m^3

P.C secos sin aire exceso = 3,6737+0,4752 = 4,1489 m^3
Aire exceso = 4,1498·(12,38/87.62) = 0,59 m^3
Aire total seco = 4,55 + 0,59 = 5,14 m^4
Aire total húmedo = 5,14/0,97 = 5,30 m^3
Aire total húmedo = 5,30 m^3 (22-1)

2.
Aire exceso = 0,59/4,55 = 0,1297
Aire exceso = 13% (22-2)

3.
El volumen da cada constituyente de los P.C, es: (22-3)
N_2 = 3,6737 + 0,59x0,79 = 4,14 m^3
O_2 = 0,59x0,21 = 0,12 m^3
CO_2 = 0,48 m^3
H_2O = 0,12+0,616+0,0528·(2/3) + 0,066·(3/7,5) + 0,88x0,44+5,30x0,03 = 1,34 m^3

4.
Total P.C = 4,14+0,12+0,48+1,34 = 6,08 m^3
H_2O en estos = 1,34·(18/22,4) · 1000 = 1077 g.
Humedad = 1077/6,08 = 177,14
Humedad = 177,14 g en 1 m^3 de P.C (22-4)

EJERCICIO N°23 (7)

Un gas de una planta de coque, hecho de un carbón de Connellsville tiene la siguiente composición:

C_6H_6	0,8%	CO_2	1,2%
C_2H_4	3,0	H_2	52,8
CH_4	32,0	N_2	0,4
CO	7,5	H_2O	2,3

Este gas entra a la puerta de un horno open-hearth a una temperatura de 90°F; presión de 31,90 in,Hg. Es quemado con 25% de aire en exceso, la temperatura y presión del cual son 1800°F y 31,20 in.

El aire contiene 2% de vapor de agua.

Los productos de combustión dejan el horno a 3000°F y 29,6 in.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de aire seco teóricamente requeridos para quemar un pie cúbico de gas, ambos medidos a condiciones normales.
2. Los pies cúbicos de aire húmedo realmente utilizados por pie cúbico de gas, ambos medidos a condiciones dadas.
3. La composición de los productos de combustión y su volumen total cuando dejan el horno.

SOLUCION

1.
Los gases combustibles en la mezcla son: C_6H_6, C_2H_4, CH_4, CO y H_2. Sus reacciones, el oxígeno consumido al igual que sus productos para la combustión de 1 ft^3 de la mezcla a C.N; se presentan en el cuadro siguiente:

Reacciones	O_2 consumido+P.C por ft^3 de gas (ft^3)		
	O_2	CO_2	H_2O
$C_6H_6 + 7\frac{1}{2} O_2 = 6CO_2 + 3H_2O$	0,06	0,048	0,024
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,09	0,06	0,06
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,64	0,32	0,64
$2CO + O_2 = 2CO_2$	0,0375	0,075	---
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0,264	---	0,528
Totales	1,0915	0,503	1.256

Aire teórico = 1,0915/0,21 = 5,2 ft^3

Aire teórico a C.N = 5,2 ft^3 (23-1)

2.

Aire total seco = 5,2x1,25 = 6,5 ft^3

Aire húmedo = 6,5/0,98 = 6,63 ft^3

Para mayor comodidad, hagamos algunos cambios de unidades:

1800°F = 982,2°C

90°F = 32,2°C

31,2 in = 792,48 mm,Hg.

31,9 in = 810,26 mm,Hg.

Dado que la composición del gas no varía con el cambio de condiciones, podemos considerar el volumen de aire calculado anteriormente, como a las condiciones en que 1 ft^3 de gas entra a las puertas del horno. Además, la estequiometría de las reacciones se mantiene.

Cambio de condiciones:

P_1 = 810,26 mm P_2 = 792,48 mm

T_1 = 273+32,2 = 305,2K T_2 = 982,2+273 = 1255,2K

V_1 = 6,63 ft^3 V_2 =?

$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) = 27,88\ ft^3$

Volumen de aire húmedo realmente utilizado, C.D = 27,9 ft^3 (23-2)

3.

P.C = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

N_2 = 6,5x0,79 + 0,004 = 5,139 ft^3

CO_2 = 0,503 + 0,012 = 0,515 ft^3

H_2O = 1,256 + (6,63-6,5) + 0,023 = 1,409 ft^3

O_2 (exceso) = (6,5 – 5,2)x0,21 = 0,273 ft^3

Composición de los P.C (23-3)

Gas	Volumen (ft^3)	Composición (%)
N_2	5,139	70,01
CO_2	0,515	7,0
H_2O	1,409	19,2
O_2	0,273	3,7
	7,336	100,0

3000°F = 1649°C

29,6 in = 751,84 mm

Cambio de condiciones:

P_1 = 760 mm P_2 = 751,84 mm

T_1 = 273K T_2 = 1649+273 = 1922K

V_1 = 7,336 ft^3 V_2 =?

V_2 = 7,336·(760/273) · (1922/751,84) = 52,2 ft^3

Volumen de los P.C al dejar el horno = 52,2 ft^3 (2: -3)

EJERCICIO N°24 (7)

Un horno para zinc es calentado con un gas natural cuyo análisis fue el siguiente:

CH_4	83,3%	H_2	2,2%
C_2H_4	3,2	N_2	1,2
CO	3,4	H_2O	2,6
CO_2	4,1		

El gas fue quemado en el horno con 5% de aire en exceso. Temperatura del aire, 25°C; presión barométrica, 745 mm; el aire estaba 2/3 saturado con vapor de agua.

La temperatura del gas cuando se quemó, 15°C.; presión, 785 mm.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire teórico seco por metro cúbico de gas, ambos medidos a condiciones normales.

2. Los metros cúbicos de aire húmedo realmente utilizado por metro cúbico de gas, ambos medidos a las condiciones reales.

3. La composición (%) de los productos de combustión cuando dejan el horno.

4. La temperatura a la cual el vapor de agua empieza a condensarse en los productos de combustión (v.g., la temperatura de saturación para la presión parcial ejercida por la humedad en los P.C).

5. Si los productos de combustión fueran enfriados por debajo de 25°C, cual sería entonces el porcentaje de vapor de agua en ellos, y cuantos gramos de agua se condensarían por metro cúbico de gas seco (medidos a condiciones normales)?

SOLUCION

1.

Los componentes gaseosos que reaccionan son: CH_4, C_2H_4, CO y H_2.

En el cuadro siguiente se muestran las reacciones de combustión, el oxígeno consumido y loa gases producidos:

Reacciones de combustión	O_2 consumido + P.C por m^3 de gas (m^3)		
	O_2	CO_2	H_2O
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	1,666	0,833	1,666
$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,096	0.064	0,064
$2CO + O_2 = 2CO_2$	0,017	0,032	---
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0,011	---	0,022
Totales	1,79	0,929	1,752

Aire teórico = 1,79/0,21 = 8,53 m^3

Aire teórico a C.N = 8,53 m^3 (24-1)

2.

Aire total seco = 8,53x1,05 = 8,96 m^3

Saturación = 2/3

Máxima presión de saturación de vapor de agua a 25°C = 23,8 mm (tablas).

Presión real del vapor de agua = 23,83(2/3) = 15,87 mm

Barómetro = 745 mm

Presión de aire seco = 745 – 15,87 = 729,13 mm

Vapor de agua = 8,96·(15,87/729,13) = 0,195 m^3

Cambio de condiciones del aire seco:

P_1 = 760 mm $\quad$ P_2 = 745 mm

T_1 = 273K $\quad$ T_2 = 273 + 25 = 298K

V_1 = 8,96 $\quad$ V_2 =?

$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2)$

V_2 = 8,96 ·(760/273) · (298/745) = 9,977 m^3

Aire húmedo = 9,977 + 0,195 = 10,172 m^3

Aire real húmedo a C.D = 10,172 m^3 (24-2)

3.

P.C = $CO_2 + N_2 + O_2 + H_2O$

N_2, aire seco C.D = 9,977x0,79 = 7,882 m^3

Aire exceso C.D = 9,977x5/105 = 0,475 m^3

O_2,exceso = 0,475x0,21 = 0,1 m^3

Para pasar de las C.N a las del aire, utilizamos la siguiente relación:

(760x298)/(273x729,13) = 1,14, así:

CO_2 = (0,929+0,041)x1,14 = 1,106 m^3

H_2O = (1,752 + 0,026)·1,14 + 0,195 = 2,222 m^3

N_2 total = 0,012x1,14 + 7,882 = 7,986 m^3.

Para cambiar de las condiciones anteriores (del aire), a las de los P.C cuando salen del horno, usaremos la siguiente relación:

$P_1 = 729,13$ $P_2 = 785$ mm
$T_1 = 298K$ $T_2 = 288K$
$(P_1/T_1)\cdot(T_2/P_2) = 0,9 \therefore$

Composición del gas al salir del horno (24-3)

Gas	Volumen	%
$CO_2 = 1,106x0,9 =$	0,9954	9,7%
$H_2O = 2,222x0,9 =$	1,9998	19,5
$N_2 = 7,986x0,9 =$	7,1874	69,9
$O_2 = 0,100x0,9 =$	0,0900	0,9
	10,2726	100,0

4.

Presión parcial del agua en P.C = 785x0,195 = 153 mm

Por tablas: T° para esta presión máxima de saturación = 62°C.

El vapor de agua empieza a condensar a 62°C (24-4)

5.

A 25°C, la presión de saturación del vapor de agua = 23,8 mm

$H_2O = 23,8/785 = 0,0303$

Vapor de agua en P.C por debajo de 25°C = 3,03% (24-5%)

Gas seco = 10,2726 – 1,9998 = 8,2728 m^3

Presión de gas seco = 785 – 153 = 632 mm

La presión equivalente al agua que se condensó será = 153 – 23,8 = 129,2 mm

Si el gas seco = 1 m^3:

Agua condensada = 1 $m^3\cdot(129,2/632) = 0,2044\ m^3$

$H_2O = 0,2044m^3\cdot(18\ Kg/22,4\ m^3)\cdot(1000\ g/1\ Kg.) = 164,3$

H_2O condensada por m^3 de gas seco = 164,3 g (24-5)

EJERCICIO N°25 (7)

El gas de coque utilizado en la combustión en un horno open-hearth para aceros, tenía la siguiente composición:

CH_4	35%	CO	6%
C_2H_2	4	O_2	1
H_2	36	N_2	12
CO_2	4	H_2O	2

Los productos de combustión tenían 4,4 g. de humedad (vapor de agua) en cada pie cúbico.

El aire utilizado para la combustión llevó humedad. Se utilizó 20% de aire en exceso.

La presión de saturación del vapor de agua a la temperatura utilizada es de 26 mm; barómetro, 760 mm.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire seco (pies cúbicos) teóricamente requerido para la combustión de un pie cúbico de gas.

2. El análisis de los productos de combustión secos (v.g. excluyendo todo el contenido de agua).

3. Los gramos de humedad por pie cúbico de aire húmedo, y el porcentaje de humedad.

SOLUCION

1.

Para el cálculo del volumen de aire seco, basémonos en la tabla siguiente el oxígeno requerido por las reacciones de combustión, al igual que los productos de las reacciones y los gases que no intervienen en ellas. Todo por ft^3 de gas.

Reacciones	Gases requeridos y productos (ft^3)/ft^3			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,70	0,35	0,70	---
$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,12	0,08	0,08	---
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0,18	---	0,36	---
CO_2	---	0,04	---	---
$2CO + O_2 = 2CO_2$	0,03	0,06	---	---
O_2	0,01	---	---	---
N_2	---	---	---	0,12
H_2O	---	---	0,02	---
Totales	1,04	0,53	1,18	0,12

Aire teórico seco = (1,04 – 0,01)/0,21 = 4,90 ft^3

Aire teórico seco = 4,90 ft^3 por ft^3 de gas (25-1)

2.

P.C secos = $N_2 + CO_2 + O_2$

Aire total seco = 4,90x1,2 = 5,88 ft^3

Aire exceso seco = 5,88 – 4,90 = 0,98 ft^3

N_2 del aire = 5,88x0,79 = 4,645 ft^3

N_2 total = 4,645 + 0,12 = 4,765 ft^3

O_2 exceso = 0,98x0,21 = 0,206 ft^3

Análisis de los P.C secos (25-2)

Gas	Volumen(ft^3)	Porcentaje
N_2	4,765	86,6
CO_2	0;53	9,6
O_2	0,206	3,8
	5,501	100,0

3.

Sea X = humedad del aire

P.C húmedos = 5,501 + 1,18 + X

Humedad por ft^3 de los P.C = 4,4 g·(0,0022lb/g) · (359 ft^3/18 lb) = 0,193 ft^3

Humedad total en los P.C = (5,501 + 1,18 + X)x0,193

Humedad total en los P.C = 1,18 + X ∴

1,18 + X =1,602 + 0,228 + 0,193X

Resolviendo: X = 0,136 ft^3

Aire húmedo = 5,88 + 0,136 = 6,016 ft^3

Humedad total en los P.C húmedos = (5,501+1,18+0,136)x4,4 = 30 g.

H_2O(gas+reacción) = 1,18 ft^3 · (18 lb/359 ft^3) · (g/0,0022 lb) = 26,9 g.

H_2O del aire = 30 – 26,9 = 3,1 g

H_2O del aire = 3,1/6,016 = 0,52 g/ft^3

Humedad del aire = 0,52 g por ft^3 de aire húmedo. (25-3)

Máxima presión de saturación = 26 mm

La cantidad máxima de agua que puede contener el aire será =

= 5,88x26 / (760-26) = 0,208 ft^3

% de humedad = grado de saturación = 100x0,136/0,208 = 65,4

Grado de saturación = 65,4% (25-3)

EJERCICIO N°26 (7)

Un carbón de Pennsylvania tiene la siguiente composición:

C	77,20%	S	1,42%
H	5,10	H_2O	1,45
O	7,22	R	5,93
N	1,68		

Este carbón es quemado con 60% de aire en exceso. Las cenizas del horno totalizan 9,3% del peso del carbón.

PREGUNTAS

1. la potencia calorífica neta, en kilocalorías por kilogramo y en BTU por libra.
2. Los metros cúbicos de aire utilizados en la combustión por kilogramo de carbón.
3. La composición en porcentaje de los productos de combustión.
4. El contenido de humedad en los gases, en gramos por metro cúbico y en granos por pie cúbico.

SOLUCION

1.

La potencia calorífica neta, práctica o baja en kilocalorías por kilogramo se calcula por medio de la fórmula de Dulong:

Potencia Calorífica Baja = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H+W) (2)

Donde los símbolos representan fracciones de 1 Kg. de los varios constituyentes mostrados en el análisis.

Cuando se hace el cálculo en BTU por libra, la fórmula de Dulong toma la forma siguiente:

Potencia Calorífica Baja = 14600C + 61000·(H – O/8) + 4000S – 1050·(9H+W) (3)

Es necesario decir que el símbolo W se refiere al agua. Los demás símbolos ya son conocidos para c/u de los elementos, Así, si abreviamos la Potencia Calorífica Neta, Práctica ó Baja con las siglas:P.C.B, tendremos

P.C.B =8100·(0,772) + 34000·(0,051 – 0,0722/8) + 2200x0,0142 – 586·(9x0,051+0,0145)

P.C.B. = 7435 Kcal.

Potencia Calorífica Neta = 7435 Kcal/Kg. (26-1)

Utilizando (3):

P.C.B. = 14600x0,772 + 61000·(0,051 – 0,0722/8) + 4000x0,0142 – 1050·(9x0,051+0,0145)
= 13393 B.T.U/lb.

Potencia Calorífica Neta = 13393 B.T.U/lb (26-1)

2.

Cálculo del carbono que reacciona:

Cenizas = R + U.C

U.C = 0,093 – 0,0593 = 0,0337 Kg.

$C \rightarrow CO_2$ = 0,772 – 0,0337 = 0,7383 Kg.

Elementos combustibles: C, H y S.

Reacciones:

$C + O_2 = CO_2$

$2H_2 + O_2 = 2H_2O$

$S + O_2 = SO_2$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,738·(22,4/12) = 1,38 m^3

O_2 del H = 0,051·(22,4/4) = 0,29 m^3

O_2 del S = 0,0142·(22,4/32) = 0,00994 m^3

O_2 del carbón = 0,0722·(22,4/32) = 0,051 m^3

O_2 del aire teórico = 1,38 + 0,29 + 0,00994 – 0,051 = 1,63 m^3

Aire teórico = 1,63/0,21 = 7,76 m^3

Aire total = 7,76x1,6 = 12,41 m^3

Aire total = 12,41 m^3 por Kg. de carbón (26-2)

3.

P.C = $CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$

CO_2 = O_2 del C = 1,38 m^3

H_2O = 0,29x2 + 0,0145·(22,4/18) = 0,598 m^3

SO_2 = O_2 del S = 0,01 m^3

N_2 = 0,0168·(22,4/28) + 12,41x0,79 = 9,8094 m^3

Aire exceso = 12,41 – 7,76 = 4,65 m^3

O_2 libre = 4,65x0,21 = 0,98 m^3

Composición de los P.C (26-3)

Gas	(m^3)	(%)
CO_2	1,38	10,8%
H_2O	0,598	4,6
N_2	9,81	76.8
SO_2	0,01	0,1
O_2	0,980	7,7
	12,778	100,0

4.

Peso específico del agua = 0,8063

Humedad = 0,598x0,8063 = 0,484 Kg. = 484 g.

Humedad en los P.C = 484/12,78 = 37,87

Humedad en los P.C = 37,87 g/m^3 de gas (26-4)

1 ft^3 = 0,028 m^3

Volumen de gases = 12,78/0,028 = 456,4 ft^3

1 gramo = 15,432 granos

Total granos = 484x15,432 = 7469

Humedad en los P.C = 7469/456,4 = 16,3

Humedad en los P.C = 16,3 gr./ft^3 de gas (26-4)

EJERCICIO N°27 (7)

Un carbón de Pennsylvania tiene la siguiente composición:

C	76,3%	S	2,5%
H	4,9	H_2O	2,0
O	3,1	N	3,0
R	8,2		

Cuando fue utilizado en un horno, las cenizas contenían 14% de carbono sin quemar. Se utilizó 30% de aire en exceso.

La temperatura del aire fue de 25°C; barómetro, 740 mm; presión parcial de humedad en el aire, 18 mm.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica práctica o baja del carbón en B.T.U por libra, y el porcentaje de ella perdido debido al carbono sin quemar en las cenizas.

2. Los pies cúbicos de aire teóricamente requeridos, secos y a condiciones normales por libra de carbón.

3. Los pies cúbicos de aire húmedo realmente utilizados, medidos a condiciones dadas por libra de carbón.

4. La composición (%) de los productos de combustión, y los granos de humedad llevada por ellos por pie cúbico a condiciones normales.

SOLUCION

1.

Mediante la ecuación (3) se puede calcular la Potencia Calorífica Neta, Baja o Práctica:

P.C.B = 14600x0,763 + 61000·(x0,049 – 0,031/8) + 4000x0,025 – 1050·(9x0,049 + 0,02) =
= 13508

Potencia Calorífica Práctica = 13508 B.T.U por libra (27-1)

Cenizas = R + U.C
 100%   86% 14%

U.C = 0,082·(14/86) = 0,013 lbs.

Potencia calorífica perdida = 14600x0,013 = 190 B.T.U

Potencia calorífica perdida = 190/13508 = 0,014

Potencia calorífica perdida = 1,4% de la neta del carbón (27-1)

2.

C → CO_2 = 0,763 – 0,013 = 0,75 lb

Elementos combustibles: C, H y S.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

$S + O_2 \rightarrow SO_2$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,75·(359/12) = 22,425 ft^3

O_2 del H = 0,049·(359/4) = 4,40 ft^3

O_2 del S = 0,025·(359/32) = 0,28 ft^3

O_2 del carbón = 0,031·(359/32) = 0,35 ft^3

O_2 del aire teórico = 22,425 + 4,40 + 0,28 – 0,35 = 26,755 ft^3

Aire teórico = 26,755/0,21 = 127,4 ft^3

Aire teórico seco (C.N) = 127,4 ft^3 (27-2)

3.

Aire total seco (C.N) = 127,4x1,3 = 165,10 ft^3

Presión parcial de humedad = 18 mm

Presión parcial de aire seco = 740 – 18 = 722 mm

Humedad = 165,10·(18/722) = 4,12 ft^3

Aire húmedo (C.N) = 165,1 + 4,12 = 169,22 ft^3

Cambio de condiciones del aire:

P_1 = 760 mm P_2 = 740 mm

T_1 = 273K T_2 = 298K

V_1 = 169,22 ft^3 V_2 =?

V_2 = 169,22·(760/273) · (298/740) = 189,7 ft^3

Aire húmedo a C.D = 190 ft^3 (27-3)

4.

P.C = $CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$

CO_2 = O_2 del C = 22,425 ft^3

SO_2 = O_2 del S = 0,28 ft^3

N_2 = N_2 (aire + carbón)

N_2 = 165,1x0,79 + 0,03 · (359/28) = 130,829 ft^3

Aire exceso = 165,1 – 127,4 = 37,7 ft^3

O_2 libre = 37,7x0,21 = 8,0 ft^3

H_2O = H_2O (reacción + carbón + humedad aire)

H_2O = 4,4x2 + 0,02·(358/18) + 4,12 = 13.32 ft^3

Composición de los P-C, C.N: (27-4)

Gas	Volumen(ft^3)	(%)
CO_2	22,425	12,8%
SO_2	0,28	0.2
N_2	130,829	74,8
O_2	8,0	4,6
H_2O	13,31	7,6
	174,844	100,0

Granos de agua =13,32 ft^3·(0,028 m^3/1 ft^3) · (0,8062 Kg/1 m^3) · (1000 g/1 Kg.) · (15,432gr 1g) = 4661 gr.

Humedad = 4661/174,844 = 26,6 gr/ft^3

Humedad = 26,6 gr/ft^3 de P.C, C.N (27-4)

EJERCICIO N°28 (7)

Un carbón presenta la siguiente composición:

C	76,0%	O	7,8%
H	4,9	H_2O	1,5
S	1,2	R	8,6

El carbón es quemado sobre una parrilla, en un horno usado para fundir cobre puro a fin de colarlo en lingotes.

Se funden 150 toneladas métricas en 10 horas, utilizando 17 toneladas métricas de carbón.

Las cenizas contenían 25% de carbono sin quemar.

Justo al finalizar la fusión del cobre, este contenía 172 kilocalorías por cada kilogramo. Los gases dejaron el horno a 1000°C.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire utilizados por kilogramo de carbón.
2. Los metros cúbicos de los gases que dejan el horno por hora, a las condiciones reales.
3. La potencia calorífica del combustible, por hora.
4. El porcentaje de la potencia calorífica original que es utilizada en la fusión del cobre.

SOLUCION

1.

U.C = 0,086·(25/75) = 0,0286 Kg.

$C \rightarrow CO_2$ = 0,76 – 0,0286 = 0,7314 Kg.

Elementos combustibles: C, H y S.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

$S + O_2 \rightarrow SO_2$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,73·(22,4/12) = 1,365 m^3

O_2 del H = 0,049·(22,4/4) = 0,2744 m^3

O_2 del S = 0,012·(22,4/32) = 0,0084 m^3

O_2 del carbón = 0,078·(22,4/32) = 0,0546 m^3

O_2 del aire teórico = 1,365 + 0,2744 + 0,0084 – 0,0546 = 1,592 m^3

Aire teórico = 1,592/0,21 = 7,58 m^3

Aire teórico = 7,58 m^3/Kg. de carbón. (28-1)

2.

Carbón total cargado = 17000 Kg.

Este carbón está distribuido así:

C = 17000x0,76 = 12920 Kg.

H = 17000x0,049 = 833

S = 17000x0,012 = 204

O = 17000x0,078 = 1326

H_2O = 17000x0,015 = 255

R .= 17000x0,086 = 1462

$C \rightarrow CO_2$ = 17000x0,7314 = 12433,8 Kg.

Volvemos a calcular el O_2 y el aire:

O_2 del C = 12433,8·(22,4/12) = 23210 m^3

O_2 del H = 833·(22,4/4) = 4664,8 m^3

O_2 del S = 204·(22,4/32) = 142,8 m^3

O_2 del carbón = 1326·(22,4/32) = 928,2 m^3

O_2 del aire teórico = 23210 + 4664,8 + 142,8 - 928,2 = 27089,4 m^3

Aire teórico seco (C.N) = 27089,4/0,21 = 128997 m^3

P.C = $CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2$

$CO_2 = O_2$ del C = 23210 m^3

$SO_2 = O_2$ del S = 142,8 m^3

$H_2O = H_2O$ (carbón + reacción)

H_2O = 255·(22,4/18) + 4664,8x2 = 9647 m^3

N_2 = 128997x0,79 = 101908 m^3

P.C (C.N) = 23210 + 142,8 +9647 + 101908 = 134907,8 m^3

Cambio de condiciones:

$P_1 = P_2$

T_1 = 273K T_2 = 1273K

V_1 = 134908 m^3 V_2 =?

$P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2 \therefore$

$V_2 = V_1 \cdot (T_2/T_1)$

V_2 = 134908·(1273/273) = 628076 m^3 de gas en 10 horas.

$V = 628076/10 = 62808\ m^3/hr.$

Gases que dejan el horno (C.D) = 62808 m³/hr. (28-2)

3.

Utilizando la ecuación (2):

P.C.B = 8100x0,76 + 34000·(0,049 – 0,078/8) + 2200x0,012 – 586·(9x0,049 + 0,015) =
= 7250 Kcal/Kg. de carbón

Potencia calorífica del carbón = 7250 Kcal./Kg. (28-3)

4.

Calor en el Cu fundido = 150x1000x172 = $2,5x10^7$ Kcal.

Potencia calorífica total del carbón = 7250x17x1000 = $1,2325x10^8$ Kcal.

Calor en la fusión del Cu. = $2,5x10^7/1,2325x10^8$ = 0,2028

Calor en fusión del Cu = 20,28% del P.C del carbón (28-4)

EJERCICIO N°29 (7)

En un horno se queman 3 toneladas métricas del siguiente carbón:

C	69,4%	O	9,6%
H	4,8	H_2O	6,2
N	0,8	R	9,2

Se forman 310 Kg. de cenizas

Los gases que salen por la chimenea totalizan 65200 m³ medidos a la temperatura de la chimenea de 230°C, y una presión de 725 mm.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del carbón por kilogramo.
2. El porcentaje de la potencia calorífica del carbón, representado por el carbono sin quemar en las cenizas.
3. Los metros cúbicos de aire teóricamente requeridos para quemar el carbón, medidos a condiciones normales.
4. El porcentaje de aire exceso utilizado.

SOLUCION

1.

Utilizando la ecuación (2):

P.C.B = 8100x0,694 + 34000·(0,048 – 0 096/8) + 0 – 586·(9x0,048 + 0,062) = 6556

Potencia Calorífica Baja = 6556 Kcal/Kg. (29-1)

2.

Cenizas = R + U.C

R = 3000x0,092 = 276 Kg.

U.C = 310 – 276 = 34 Kg.

Potencia calorífica en U.C = 8100x34 = 275400 Kcal

P.C.B (total del carbón) = 6556x3000 = $1,9668x10^7$ Kcal.

Potencia calorífica de U.C = $2,754x10^5/1,9668x10^7$ = 0,014

Potencia Calorífica de U.C = 1,4% de la del carbón (29-2)

3.

Distribución del carbón:

C = 3000x0,694 = 2082 Kg.
H = 3000x0 048 = 144
N = 3000x0,008 = 24
O = 3000x0 096 = 288
H_2O = 3000x0,062 = 186
R = 3000x0,092 = 276

$C \rightarrow CO_2$ = 2082 – 34 = 2048 Kg.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 2048·(22,4/12) = 3823 m³

O_2 del H = 144·(22,4/4) = 806,4 m^3
O_2 del carbón = 288·(22,4/32) = 201,6 m^3
O_2 aire teórico = 3823 + 806 – 202 = 4427 m^3
Aire teórico = 4427/0,21 = 21081 m^3
Aire teórico a C.N = 21081 m^3 (29-3)

4.
P.C = CO_2 + H_2O + N_2(sin aire exceso) + aire exceso
CO_2 = O_2 del C = 3823 m^3
H_2O = H_2O (carbón + reacción)
H_2O = 186·(22,4/18) + 2x806,4 = 1844 m^3
N_2 (sin aire exceso) = 24·(22,4/28) + 21081x0,79 = 16673 m^3
P.C (sin aire exceso), C.N = 3823 + 1844 + 16673 = 22340 m^3

Llevamos estos gases a las condiciones de la chimenea:
P_1 = 760 mm P_2 = 725 mm
T_1 = 273K T_2 = 503K
V_1 = 22340 m^3 V_2 =?
V_2 = 22340·(760/273) · (503/725) = 43148 m^3 C.D
Aire exceso C.D = 65200 – 43248 = 21952 m^3 C.D
Aire teórico C.D = 21081·(760/273) · (503/725) = 40717 m^3
Aire exceso = 21952/40717 = 0,539
Aire exceso = 53,9% (29-4)

EJERCICIO N°30 (7)

Un alto horno de la Bethlehem quema en su zona de combustión 760 toneladas métricas por día.

El coque tiene la siguiente composición:

C	88,8%
H	1,2
O	0,8
R	8,8
H_2O	0,4

En la zona de combustión del alto horno, las condiciones son tales que el carbono del coque se quema completamente a CO, mientras que el H no se quema; no hay aire en exceso.

Las condiciones atmosféricas promedias para los meses de Enero a Julio, de acuerdo al Lehigh University Weather Bureau, fueron las siguientes:

Enero: Temperatura, - 1°C; Presión, 754 mm.; humedad, 78%
Julio: Temperatura, 24°C; Presión, 747 mm.; humedad, 68%

El carbono quemado a CO desarrolla 2430 cal. Por kilogramo.

La humedad del aire es descompuesta en la zona de combustión del horno, absorbiendo 3213 Kcal. por kilogramo.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de soplo (aire) utilizados por kilogramo de coque, si el aire se asume seco a condiciones normales.
2. Lo anterior pero incluyendo la humedad, y medidos a las condiciones atmosféricas de Julio.
3. La potencia calorífica del coque (por kilogramo).
4. El porcentaje de esta potencia calorífica que es realmente desarrollada en la zona de combustión del horno.
5. Los kilogramos de agua que entran en el horno a través del soplo, en Enero y en Julio.
6. ¿Qué porcentaje del calor desarrollado en el horno por combustión del coque, fue requerido para descomponer esta agua en cada uno de estos meses?
7. la composición (%) del gas resultante de la combustión, en Enero.

SOLUCION

1.

Reacción de combustión:

$2C + O_2 \rightarrow 2CO_2$

En este caso, el O_2 del combustible no se le resta al de las reaccione para encontrar el del aire, debido a que en este horno la carga sólida entra por arriba, mientras que el aire entra por la parte inferior. A la zona de combustión solo llegan el C y las cenizas, pues el oxígeno en la trayectoria se ha evaporado si está en forma de agua o ha reaccionado con algún otro elemento.

O_2 del C = 0,888·(22,4/2x12) = 0,8288 m^3

Aire = 0,8288/0,21 = 3,94 m^3

Aire seco a C.N = 3,94 m^3 (30-1)

2.

Máxima presión de vapor de agua a 24°C = 22,4 mm (tablas)

Presión real = 22,4x0,68 = 15,2 mm

Presión de aire seco = 747 – 15,2 =731,8 mm

Humedad = 3,94·(15,2/731,8) = 0,082 m^3

Aire húmedo C.N = 0,082 + 3,94 = 4.022 m^3

Cambio de condiciones para el mes de Julio:

P_1 = 760 mm P_2 = 747 mm

T_1 = 273K T_2 = 273+28 = 301K

V_1 = 4,022 m^3 V_2 =?

V_2 = 4,022·(760/273) · (301/747) = 4,51 m^3

Aire húmedo a C.D; mes de Julio = 4,51 m^3 (30-2)

3.

Utilizando la ecuación (2):

P.C.B = 8100x0,888 + 34000·(0,012 – 0,008/8) + 0 – 586·(9x0,012 + 0) = 7503,5

Potencia calorífica del coque = 7503,5 Kcal/Kg. (30-3)

4.

Potencia calorífica (C→CO) = 0,888x2430 = 2157,84 Kcal./Kg.

Potencia calorífica desarrollada = 2157,84/7504 = 0,287

P.C del coque desarrollada en zona combustión = 28,7% (30-4)

5.

C total en coque = 0,888x760x1000 = 674880 Kg.

O_2 del C = 674880·(22,4/24) = 629888 m^3

Aire total C.N = 629888/0,21 = 2'999.466 m^3

Humedad del aire en Julio = 2'999.466·(15,2/731,8) = 62301 m^3

Humedad del aire en Julio = 62301(18/22,4) = 50063 Kg./día

Humedad del aire en Julio = 50063 Kg./día (30-5)

Para el mes de Enero:

Máxima presión de vapor a –1°C = 4,2 mm (interpolación)

Presión real = 4,2x0,78 = 3,28 mm

Presión de aire seco = 754 – 3,28 = 750,72 mm

Humedad = 2'999.466·(3,28/750,72) = 13105 m^3

Humedad del aire en Enero = 13105·(18/22,4) = 10530 Kg./día

Humedad del aire en Enero = 10530 Kg./día (30-5)

6.

Potencia calorífica total (C→CO) = 2158x674880 = 1456'391.040 Kcal.

Calor de descomposición agua (Enero) = 10530x3213 = 33'832.890 Kcal.

Calor de descomposición agua (Enero) = 33'832.890/1456'391.040 = 0,023

Calor de descomposición agua (Enero) = 2,3% (30-6)

Calor de descomposición agua (Julio) = 50063x3213 = 160'852.419 Kcal.

Calor de descomposición agua (Julio) = 160'852.419/1456'391.040 = 0,110

Calor de descomposición agua (Julio) = 11,0% (30-6)

7.

Gas resultante de la combustión en Enero = CO + N_2 + H_2

CO (C.N) = 674880·(22,4/12) = 1'259.776 m^3

N_2 (C.N) = 2'999.466x0,79 = 2'369.578 m^3

H_2 = H_2 (coque + humedad coque + humedad aire)

H_2 del coque = 760x1000x0,012x22,4/2 = 102144 m^3(C.N)

Descomposición del agua:

$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$

H_2 del agua del coque = 760x1000x0,004x22,4/18 = 3783 m^3

Humedad mes de Enero = 13105 m^3

Esta humedad debe ser pasada a C.N:

$H_2O = H_2$ = 13105·(751/272) · (273/760) = 12997 m^3

H_2 = 102144 + 3783 + 12997 = 118924 m^3

Composición del gas en el mes de Enero (30-7)

Gas	Volumen (m^3)	Composición
CO	1'259.776	33,6%
N_2	2'369.578	63,2
H_2	118.924	3,2
	3'748.278	100,0

EJERCICIO N°31 (7)

Un horno es calentado con un aceite que tiene la siguiente composición:

C	84,6%
H	10,9
S	0,7
O	3,8

Se suministró 15% de aire en exceso. La gravedad específica del aceite, 0,924; grados Beaumé, 21,5.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del aceite, ambas alta y baja, en BTU por libra y en Kcal. por galón (usar le fórmula de Dulong).
2. La potencia calorífica calculada por la fórmula de Sherman y Kropff.
3. Los pies cúbicos de aire utilizado, por libra de aceite.
4. Porcentaje de oxígeno libre en los productos de combustión.

SOLUCION

1.

La fórmula de Dulong para la potencia calorífica alta o bruta (P.C.A) de un combustible es:

P.C.A = 14600C + 61000·(H-O/8) + 4000S = BTU por libra

P.C.A = 14600x0,846 + 61000·(0,109 – 0,038/8) + 4000x0,007 = 18740

Potencia Calorífica Alta = 18740 BTU/lb (31-1)

Con la fórmula (3).calculamos la potencia calorífica baja:

P.C.B = 14600x0,846 + 61000·(0,109 – 0,038/8) + 4000x0,007 – 1050·(9x0,109 + 0) =
= 17710

Potencia Calorífica Baja = 17710 BTU/lb (31-1)

P.C.A = 8100C + 34000·(H –O/8) + 2200S

P.C.A = 8100x0,846 + 34000·(0,109 – 0,038/8) + 2200x0,007 = 10412,5 Kcal/Kg.

Volumen de 1 Kg. de aceite = 1/0,924 = 1,082 m^3

1 galón = 3,785 litros.

P.C.A = 10412,5Kcal/Kg.x(1Kg./1,082 m^3)X(1 m^3/1000 lts)x(3,785 lts/1 galón) =
= 36,428 Kcal/galón

Potencia Calorífica Alta = 36,428 Kcal/galón (31-1)

Utilizando la fórmula (2):

P.C.B = 8100C + 34000·(H – 0/8) + 2200S – 586·(9H + W)

P.C.B = 10412,5 0 574,6 Kcal/Kg.

Potencia Calorífica Baja = 34,417 Kcal/galón (3-1)

2.

La Fórmula de Sherman y Kropff, es la siguiente:

BTU/lb = 18650 + 40·(°Bé – 10)

°Bé = grados Beaumé ∴

BTU/lb = 18650 + 40·(21,5 – 10) = 19110

Potencia Calorífica del aceite = 19110 BTU/lb (31-2)

3.

Reacciones de combustión:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$
$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

O_2 del C = 0,846·(359/12) = 25,2954 ft^3

O_2 del H = 0,109·(359/4) = 9,7828 ft^3

O_2 del S = 0,007·(359/32) = 0,0785 ft^3

O_2 del aceite = 0,038·(359/32) = 0,4260 ft^3

O_2 para el aire teórico = 25,2954 + 9,7828 + 0,0785 – 0,426 = 34,7307 ft^3

Aire teórico = 34,7307/0,21 = 165,38 ft^3

Aire total = 165,38x1,15 = 190 ft^3

Aire utilizado por libra de aceite = 190 ft^3 (31-3)

4.

P.C = $N_2 + CO_2 + H_2O + SO_2 + O_2$

N_2 = 190x0,79 = 150,1 ft^3

CO_2 = O_2 del C = 25,3 ft^3

SO_2 = O_2 del S = 0,08 ft^3

H_2O = 2 O_2 del H = 9,78x2 = 19,56 ft^3

Aire exceso = 190 – 165,38 = 24,62 ft^3

O_2 libre = 24,62x0,21 = 5,17 ft^3

Total P.C = 150,1 + 5,17 + 25,30 + 19,56 + 0,08 = 200,21 ft^3

O_2 en P.C = 5,17/200,21 = 0,026

O_2 libre en P.C = 2,6% (31-4)

EJERCICIO N°32 (7)

Un horno utiliza un gas de coquería de la siguiente composición:

H_2	37,6%	CO	5,6%
CH_4	40,8	CO_2	3,7
C_2H_4	4,6	N_2	5,4
C_6H_6	1,2	H_2O	1,1

El gas es quemado con 20% de aire en exceso. El aire lleva humedad; asumir que la humedad es del 40%.

La temperatura del aire es 25°C; barómetro, 730 mm.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del gas, por metro cúbico a C.N y por metro cúbico a condiciones atmosféricas.

2. Los metros cúbicos de aire húmedo a condiciones dadas, utilizados para quemar 1 m^3 de gas a condiciones normales.

3. El volumen de los gases resultantes de la combustión de un metro cúbico de gas a condiciones normales.

SOLUCION

1.

La potencia calorífica de los combustibles gaseosos se calcula sumando las potencias caloríficas de los gases constituyentes individuales. En este caso, cualquier contenido de agua se encontrará en forma de vapor y no necesita calor adicional para vaporizarse.

La potencia calorífica de los gases principales se dan en la tabla que se muestra a continuación. Una tabla más extensa se encuentra en el Apéndice.

Potencia Calorífica (Baja) de los Gases Combustibles más Comunes(C.N)

Gas	Kilocalorías por metro cúbico	B.T.U por pie cúbico
CO	3034	341
H_2	2582	290
CH_4	8560	962
C_2H_2	13440	1510
C_2H_4	14480	1627
C_6H_6	33490	3763

De acuerdo con la tabla anterior, la potencia calorífica a C.N para c/u de los gases de la mezcla sería:

H_2 = 0,376x2582 = 971 Kcal
CH_4 = 0,408x8560 = 3492
C_2H_4 = 0,046x14480 = 666
C_6H_6 = 0,012x33490 = 402
CO = 0,056x3034 = 170
5701

Potencia calorífica a C.N = 5701 Kcal/m³ de gas (32-1)

Como el valor calculado anteriormente se refiere a condiciones normales, debemos determinar 1 m³ de gas a condiciones atmosféricas, a cuantos m³ de gas a C.N corresponde:

$P_1 = 730$ mm $P_2 = 760$ mm
$T_1 = 298K$ $T_2 = 273K$
$V_1 = 1\ m^3$ $V_2 = ?$
$V_2 = 1\cdot(730/298)\cdot(273/760) = 0,88\ m^3$
Potencia calorífica = 5701·(0,88/1) = 5017

Potencia Calorífica a C.D = 5017 Kcal/m³ de gas (32-1)

2.

Para el cálculo del aire seco, basémonos en el siguiente cuadro que muestra las reacciones de la combustión, el oxígeno producido así como los productos de las reacciones, por m³ de gas a C.N:

Reacciones	O_2 + Productos (m^3)			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0,188	---	0,376	---
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,816	0,408	0,816	---
$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,138	0,092	0,092	---
$C_6H_6 + 7\frac{1}{2} O_2 = 6CO_2 + 3H_2O$	0,090	0,072	0,036	---
$2CO + O_2 = 2CO_2$	0,028	0,056	---	---
CO_2	---	0,037	---	---
H_2O	---	---	0,011	---
N_2	---	---	---	0,054
Totales	1,260	0,665	1,331	0,054

Aire teórico seco = 1,26/0,21 = 6.0 m³ (C.N)
Aire total seco a C.N = 6,0x1,2 = 7,20 m³
Humedad del aire = 40% ∴

Máxima presión de saturación del aire con vapor de agua a 25°C = 23,8 mm (tablas)
Presión real = 23,8x0,4 = 9,52 mm
Cálculo del aire húmedo C.D:

$P_1 = 760$ mm $P_2 = 730 - 9,52 = 720,48$ mm
$T_1 = 273K$ $T_2 = 298K$
$V_1 = 7,2\ m^3$ $V_2 = ?$
$V_2 = 7,2\cdot(760/273)\cdot(298/720,48) = 8,29\ m^3$

Aire húmedo C D por m³ de gas = 8,29 m³. (32-2)

3.

P.C = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$
$N_2 = 7,2x0,79 + 0,054 = 5,74\ m^3$

O_2 libre = (7,2 –6)x0,21 = 0,252 m^3
H_2O = 1,331 + 7,2 · (9,52/720,48) = 1,426 m^3
Total P.C = 0,665 + 5,74 + 0,252 + 1,426 = 8,08 m^3
P.C resultante de la combustión de 1 m^3 de gas = 8,08 m^3 (32-3)

EJERCICIO N°33 (7)

Un gas de un productor de gas, utilizado para calentar un horno open-hearth tenía la siguiente composición:

CO	25,4%	CH_4	2,1%
CO_2	4,4	H_2O	2,9
H_2	17,2	N_2	48,0

Este gas fue quemado con 10% de aire en exceso. El aire utilizado llevó humedad en cantidad de 16 granos por pie cúbico de aire húmedo. Presión barométrica, 750 mm.

PREGUNTAS

1. la potencia calorífica del gas, por pie cúbico.
2. Los pies cúbicos de aire húmedo utilizados para quemar un pie cúbico de gas.
3. La composición (%) de los productos de combustión.
4. La presión parcial de la humedad en (a) el aire, (b) los productos de combustión.

SOLUCION

1.
Ver la tabla del ejercicio #32 para el cálculo de la potencia calorífica de:
CO = 341x0,254 = 87 BTU
H_2 = 290x0,172 = 50
CH_4 = 962x0,021 = 20
Potencia calorífica total = 87 + 50 + 20 = 157 BTU
Potencia calorífica por ft^3 del gas = 157 BTU (33-1)

2.
El cuadro siguiente muestra el O_2 consumido y los productos de combustión de las respectivas reaccione, pie ft^3 de gas:

Reacciones	O_2 + P.C (ft^3)			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2
$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	0,127	0,254	---	---
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	0,086	---	0,172	---
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	0,042	0,021	0,042	---
CO_2	---	0,044	---	---
H_2O	---	---	0,029	---
N_2	---	---	---	0,48
Totales	0,255	0,319	0,243	0,48

Aire teórico seco = 0,255/0,21 = 1,214 ft^3
Aire total seco = 1,214x1,1 = 1,3354 ft^3
Total granos = 1,3354x16 = 21,3664
1 grano = 0,0648 gramos
Gramos = 21,3664x0,0648 = 1,385
Peso específico del agua = 0,8063
Humedad = 1,385/(0,8063x1000) = 0,00171 m^3
Humedad = $1,71x10^{-3}$ /$2,8x10^{-2}$ = 0,061 ft^3
Aire húmedo = 1,33 + 0,061 = 1,39 ft^3
Aire húmedo = 1,39 ft^3 (33-2)

3.
P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2
N_2 = 1,3354x0,79 + 0,48 = 1,535 ft^3
H_2O = 0,243 + 0,061 = 0,403 ft^3
O_2 libre = (1,335 – 1,214)x0,21 = 0,0254 ft^3

Composición de los P.C (33-3)

Gas	Volumen (ft^3)	Composición (%)
CO_2	0,319	14,6
N_2	1,535	70,3
O_2	0,0254	1,2
H_2O	0,304	13,9
	2,1834	100,0

4.

Aire húmedo = 1,39 ft^3
Humedad = 0,061 ft^3
H_2O en aire = 0,061/1,39 = 0,044 = 4,4%
Presión parcial de humedad en el aire = 0,044x760 = 33,44 mm
(a):Presión parcial de humedad en el aire = 33,44 mm (33-4)
Presión parcial en los P.C = 0,139x750 = 105,0 mm.
(b): Presión parcial de humedad en los P.C = 105,0 (33-4)

EJERCICIO N°34 (7)

La siguiente es la composición de un carbón de Newcastle, England (análisis seco):

C	78,0%	S	1,4%
H	4,8	N	1,8
O	10,3	R	3,7

En adición el carbón lleva humedad en una cantidad igual al 4,2% de su peso seco. Este carbón es quemado en un horno de fusión con 60% de aire exceso.

Las cenizas del horno llegan al 4,3% del peso del carbón.

El aire, asumido seco, se encuentra a 20°C y 740 mm de presión.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del carbón, seco y húmedo.
2. Los metros cúbicos de aire utilizado para quemar el carbón, por kilogramo de carbón húmedo, a las condiciones dadas.
3. El volumen y la composición de los productos de combustión, tal como salen del horno.
4. La cantidad de calor, kilocalorías por kilogramo de carbón húmedo, que sale del horno en los productos de la combustión.

SOLUCION

1.

Análisis seco:
Basta utilizar la expresión (2) de Dulong para encontrar la potencia calorífica:
P.C.B = 81000x0,78 + 34000·(0,048 – 0,103/8) + 2200x0,014 – 586·(9x0,048 + 0) =
= 7289,898
Potencia Calorífica Baja = 7290 Kcal./Kg. de carbón (34-1)
Análisis húmedo:
Peso del carbón seco = 1 Kg.
Peso del carbón húmedo = 1 + 0,042 = 1,042 Kg.
La composición del carbón húmedo sería:

C	0,780 Kg.	74,86%
H	0,048	4,61
O	0,103	9,88
S	0,014	1,34
N	0,018	1,73
R	0,037	3,55
H_2O	0,042	4,03
	1,042 Kg.	100,00

$P.C.B = 8100x0,7486 + 34000\cdot(0,0461 - 0,0988/8) + 2200x\ 0,0134 - 586\cdot(9x0,0461 + 0,0403)$
$= 6974$

Potencia Calorífica Baja = 6974 Kcal./Kg. de carbón (34-1)

2.

$$U.C = 0,043 - 0,0355 = 0,0075 \text{ Kg.}$$

Reacciones de combustión:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$
$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

O_2 del C = $0,741\cdot(22,4/4) = 1,383\ m^3$
O_2 del H = $0,0461\cdot(22,4/4) = 0,258\ m^3$
O_2 del S = $0,0134\cdot(22,4/32) = 0,009\ m^3$
O_2 del carbón = $0,0988\cdot(22,4/32) = 0,07\ m^3$
O_2 del aire teórico = $1,383 + 0,258 + 0,009 - 0,07 = 1,58\ m^3$
Aire total C.N = $1,6\cdot(1,58/0,21) = 12,04\ m^3$

Cambio de condiciones:

$P_1 = 760$ mm $\quad P_2 = 740$ mm
$T_1 = 273K \quad T_2 = 293K$
$V_1 = 12,04\ m^3 \quad V_2 = ?$

$V_2 = 12,04\cdot(760/273)\cdot(293/740) = 13,27\ m^3$

Aire = 13,27 m^3/Kg. de carbón húmedo (34-2)

3.

$P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$

$CO_2 = O_2$ del C = $1,383\ m^3$
$H_2O = 0,258x2 + 0,0403\cdot(22,4/18) = 0,566\ m^3$
$SO_2 = O_2$ del S = $0,009\ m^3$
$N_2 = 0,0173\cdot(22,4/28) + 12,04x0,79 = 9,525\ m^3$
O_2 libre = $(12,04 - 1,58/0,21)x0,21 = 0,948\ m^3$

Volumen y composición de los P.C (34-3):

Gas	Volumen(m^3)	Composición(%)
CO_2	1,383	11,13
H_2O	0,566	4,55
N_2	9,525	76,62
O_2	0,948	7,63
SO_2	0,009	0,07
	12,431	100,00

La composición al salir del horno es la misma que a C.N, pero el volumen cambia:

$P_1 = 760$ mm $\quad P_2 = 760$ mm
$T_1 = 273K \quad T_2 = 1273K$
$V_1 = 12,431\ m^3 \quad V_2 = ?$

$V_2 = 12,431\cdot(1273/273) = 58\ m^3$

Volumen del gas al salir del horno = 58 m^3 (34-3)

4.

Para este cálculo utilizaremos la siguiente expresión:

Contenido de calor sensible = cantidad x calor específico x temperatura (4)

Los calores específicos se encuentran en la Tabla XV en el Apéndice, sus unidades en este caso son Kcal./m^3, a C.N.

Estos calores específicos son para:

CO_2 y SO_2: $0,406 + 9x10^{-5}t$
H_2O: $0,373 + 5x10^{-5}t$
N_2 y O_2: $0,302 + 2,2x10^{-5}t$

T = °C.

Contenido de calor de los gases al salir:

$SO_2 + CO_2 = (0,009+1,383)\cdot(0,406+9x10^{-5}x1000)x1000 = 690,4$ Kcal.

$H_2O = 0{,}566\cdot(0{,}373+5x10^{-5}x1000)x1000 = 239{,}4$ Kcal.
$N_2 + O_2 = (9{,}525+0{,}948)\cdot(0{,}302+2{,}2x10^{-5}x1000)x1000 = 3393{,}3$ Kcal.
Total calor = 690,4 + 239,4 + 3393,3 = 4323,1 Kcal.
Calor sacado por los gases = 4323,1 Kcal/Kg. de carbón húmedo (34-4)

EJERCICIO N°35 (7)

Un horno utiliza el siguiente carbón:

C	80%
H	4
O	8
H_2O	4
R	4

Las cenizas tomadas del horno contenían 3 ½ partes de residuo a 1 parte de carbono.

La cantidad de aire utilizado fue 1/6 más que el teóricamente requerido.

El aire contiene humedad en cantidad de 25 gramos por metro cúbico de aire húmedo. Los gases dejan la chimenea a 600°C.

PREGUNTAS

1. El porcentaje de la potencia calorífica del carbón que sale por la chimenea en los productos de combustión calientes.

SOLUCION

1.
P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)
P.C.B = 8100x0,8 + 34000·(0,04 – 0,08/8) + 0 – 586·(9x0,04 + 0,04) = 7266 Kcal/Kg de carbón
Por cada 3,5 partes de residuo(R) hay 1 parte de carbono (U.C) en las cenizas:
U.C = 0,04/3,5 = 0,0114 Kg.
$C \rightarrow CO_2 = 0{,}8 - 0{,}011 = 0{,}789$ Kg.
$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$
Estos son los gases calientes que salen por la chimenea y para calcularlos debemos empezar por el cálculo del aire teórico:
Reacciones de combustión:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

Cálculo del oxígeno para el aire teórico:
O_2 del C = 0,798·(22,4/12) = 1,475 m^3
O_2 del H = 0,04·(22,4/4) = 0,224 m^3
O_2 del carbón = 0,08·(22,4/32) = 0,056 m^3
O_2 aire teórico = 1,475 + 0,224 – 0,056 = 1,643 m^3
Aire teórico seco = 1,643/0,21 = 7,82 m^3
Aire total seco = 1,82·(7/6) = 9,12 m^3
Cálculo de la humedad del aire:
Sea X = m^3 de aire húmedo
Humedad del aire = 25X g.(1 Kg./1000 g) · (22,4/18) = 0,031X m^3
Aire seco = X – 0,031X = 0,969X
0,969X = 9,12 ∴
X = 9,12/0,969 = 9,412 m^3
Humedad = 9,412x0,031 = 0,292 m^3
H_2O total = 0,292·(18/22,4) + 0,04 + 0,224·(18/22,4) = 0,455 Kg.

$CO_2 = 0,789 \cdot (44/12) = 2,893$ Kg.
$N_2 = 9,12x0,79 \cdot (28/22,4) = 9,01$ Kg.
O_2 exceso $= (9,12 - 7,82)x0,21 \cdot (32/22,4) = 0,39$ Kg.

La ecuación (4) se puede resumir en la siguiente fórmula:

$$Q = W(A + Bt)xt \qquad (4)$$

donde:

Q = contenido de calor sensible
W = cantidad de gas
A + Bt = calor específico (tabla XV del Apéndice)
T = temperatura.

Aplicando (4) y los datos de la tabla XV del Apéndice tendremos:

Contenido de calor sensible de:

$CO_2 = 2,893 \cdot (0,205 + 4,6x10^{-5}x600)x600 = 404$ Kcal.
$H_2O = 0,455 \cdot (0,463 + 6,2x10^{-5}x600)x600 = 137$ Kcal
$N_2 = 9,01 \cdot (0,241 + 1,8x10^{-5}x600)x600 = 1364$ Kcal
$O_2 = 0,39 \cdot (0,211 + 1,56x10^{-5}x600)x600 = 32$ Kcal.
$Q = 404 + 137 + 1364 + 52 = 1957$ Kcal.
$Q = 1957/7266 = 0,2693$

Calor sacado por los P.C = 26,93% de la P.C.B del carbón (35-1)

EJERCICIO N°36 (7)

Un horno de fusión quema carbón pulverizado de Illinois, utilizando 20% de aire en exceso del teóricamente requerido; el aire contenía 1% de humedad. El análisis del carbón es el siguiente:

C	54,8%	N	1,1%
H	3,9	S	3,6
O	8,7	R	14,7
H_2O	13,2		

Los productos gaseosos resultantes de la combustión dejan el horno a 2200°F.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de aire (húmedo) utilizados, por libra de carbón.
2. El volumen y composición (%), de los productos de la combustión.
3. La potencia calorífica del carbón.
4. El porcentaje del valor calorífico del carbón perdido en los gases calientes.
5. ¿Qué proporción de esta pérdida es debida al aire en exceso?

SOLUCION

1.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$
$S + O_2 \rightarrow SO_2$

Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

O_2 del C $= 0,548 \cdot (359/12) = 16,39\ ft^3$
O_2 del H $= 0,039 \cdot (359/4) = 3,50\ ft^3$
O_2 del S $= 0,036 \cdot (359/32) = 0,40\ ft^3$
O_2 del carbón $= 0,087 \cdot (359/32) = 0,98\ ft^3$
O_2 del aire teórico $= 16,39 + 3,50 + 0,40 - 0,98 = 19,31\ ft^3$
Aire teórico seco $= 19,31/0,21 = 91,95\ ft^3$
Aire total seco $= 91,95x1,2 = 110,34\ ft^4 = 99\%$
Aire total húmedo $= 110,34/0,99 = 111,4\ ft^3$

Aire total húmedo = 111,4 ft^3/lb de carbón. (36-1)

2.

$P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$

$CO_2 = O_2$ del C = 16,39 ft^3

$SO_2 = O_2$ del S = 0,40 ft^3

$H_2O = H_2O$ (carbón + reacción + humedad aire)

$H_2O = 0,132\cdot(359/18) + 3,50x2 + (111,4 - 110,34) = 10,69$ ft^3

$N_2 = N_2$ (carbón + aire)

$N_2 = 110,34x0,79 + 0,011\cdot(359/28) = 87,48$ ft^3

O_2 libre = $(110,34 - 91,95)x0,21 = 3,86$ ft^3

Total P.C = 16,39 + 0,40 + 10,69 + 87,48 + 3,86 = 119 ft^3

Composición de los productos de combustión (36-2)

Gas	Volumen(ft^3)	Composición (%)
CO_2	16,39	13,4
SO_2	0,40	0,3
N_2	87,48	73,7
O_2	3,86	3,2
H_2O	10,69	14,0
	119,00	100,0

3.

P.C.B = 14600C + 61000·(H – O/8) + 4000S – 1050·(9H + W)

P.C.B = 14600x0,548 + 61000·(0,039 – 0,087/8) + 4000x0,036 – 1050·(9x0,039 + 0,132) =
= 9346 BTU

Potencia calorífica baja = 9346 BTU/lb de carbón (36-3)

4.

Vamos a llevar los volúmenes a peso, para poder usar los valores de la tabla XV del Apéndice:
Peso de:

$CO_2 = 16,39\cdot(44/359) = 2,0$ lbs.

$H_2O = 10,69\cdot(18/359) = 0,53$ lbs.

$SO_2 = 0,40\cdot(64/359) = 0,07$ lbs.

$N_2 = 87,48\cdot(28/359) = 6,82$ lbs.

$O_2 = 3,86\cdot(32/359) = 0,34$ lbs.

Utilizando la ecuación #4 y los datos de la columna 4 de la tabla XV del Apéndice, podremos calcular el calor sacado por los gases:

°C = 5/9·(2200 – 32)·= 1204

Contenido de calor en:

$CO_2 = 2,0\cdot(0,205 + 4,6x10^{-5}x1204)x1204 =$ 627,00 lbs-cal

$H_2O = 0,53\cdot(0,463 + 6,2x10^{-5}x1204)x1204 =$ 343,0 "

$N_2 = 6,82\cdot(0,241 + 1,8x10^{-5}x1204)x1204 =$ 2157,0 "

$O_2 = 0,34\cdot(0,211 + 1,56x10^{-5}x1204)x1204 =$ 94,0 "

$SO_2 = 0,07\cdot(0,139 + 3,1x10^{-5}x1204)x1204 =$ 15,0 "

Contenido de calor en los gases = 3236,0 Lbs-cal

1 lb-cal = 1,8 BTU

Contenido de calor en los gases = 3236x1,8 = 5825 BTU

Calor perdido en los gases = 5825/9346 = 0,623

Calor perdido en los gases = 62,3% (36-4)

5.

Aire exceso = 110,34 – 91,95 = 18,39 ft^3

Aire exceso = 18,39·(29/359) = 1,48 lbs.

Contenido de calor en este = $1,48\cdot(0,234 + 1,73x10^{-5}x1204)x1204$ = 454 lb-cal.

Contenido de calor en aire exceso = 454x1,8 = 817 BTU

Porporción de pérdida en aire exceso = 817/5825 = 0,1403

Proporción de pérdida en aire exceso = 14,03% (36-5)

EJERCICIO N°37 (7)

Un carbón bituminoso presenta el siguiente análisis:

C	68%
H	7
O	9
H_2O	4
R	12

Este carbón es utilizado en el calentamiento de un horno de reverbero, y los gases productos de la combustión salen del horno a 1200°C.

El aire contiene 20 gramos de humedad por metro cúbico de aire húmedo. Asumir que esta humedad pasa intacta a través del horno.

En el caso (a), el carbón es quemado con 80% de aire en exceso y las cenizas llegan al 14% del peso del carbón.

En el caso (b), se utiliza solamente el 40% de aire exceso y las cenizas contienen 1/3 de carbono.

PREGUNTAS

1. Comparar, para los dos casos, la pérdida de calor representada por el poder de calentamiento del carbono sin quemar más el calor sacado por los productos de combustión calientes..

SOLUCION

1.

Caso (a):

U.C = cenizas – R

U.C = 0,14 – 0,12 = 0,02 Kg.

$C \rightarrow CO_2 = 0,68 - 0,02 = 0,66$ Kg.

Calor perdido en U.C = 0,02x8100 = 162 Kcal.

Reacciones de combustión:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

O_2 del C = 0,66·(22,4/12) = 1,232 m^3

O_2 del H = 0,07·(22,4/4) = 0,392 m^3

O_2 del carbón = 0,09·(22,4/32) = 0,063 m^3

O_2 del aire teórico = 1,232 + 0,392 – 0,063 = 1,561 m^3

Aire teórico seco = 1,561/0,21 = 7,434 m^3

Aire total seco = 7,434x1,8 = 13,381 m^3

Aire exceso seco = 13,381 – 7,434 = 5,974 m^3

H_2O en 1 m^3 de aire húmedo = 20 g·(1Kg/1000g)·(22,4 m^3/18 Kg.) = 0,025 m^3

Aire seco en 1 m^3 de aire húmedo = 1 – 0,025 = 0,975 m^3.

El aire húmedo está compuesto por 97,5% de aire seco y 2,5% de humedad.

H_2O en aire húmedo = 13,381·(2,5/97,5) = 0,343 m^3

Aire total húmedo = 13,381 + 0,343 = 13,724 m^3

$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

$CO_2 = O_2$ del C = 1,232 m^3

$H_2O = H_2O$ (carbón + reacción + humedad)

$H_2O = 0,04·(22,4/18) + 0,392x2 + 0,343 = 1,177$ m^3

$N_2 = 13,381x0,79 = 10,571$ m^3

O_2 exceso = 5,947x0,21 = 1,249 m^3

$N_2 + O_2 = 10,571 + 1,249 = 11,82$ m^3

Aplicando la ecuación (4) y valores de la tabla XV del Apéndice, podremos calcular el contenido de calor sacado por los gases calientes a 1200°C:

$N_2 + O_2 = 11,82·(0,302 + 2,2x10^{-5}x1200)x1200 = 4658$ Kcal.

$H_2O = 1,177·(0,373 + 5,0x10^{-5}x1200)x1200 = 612$ Kcal.
$CO_2 = 1,232·(0,406 + 9,0x10^{-5}x1200)x1200 = 760$ Kcal.
Pérdida total de calor en gases = 4658 + 612 + 760 = 6030 Kcal.
Pérdida total de calor = 6030 + 162 = 6192 Kcal. (37-1.a)

Caso (b):
Cenizas = R + U.C
3/3 2/3 1/3
U.C = 0,12·{(1/3) ÷ (2/3)} = 0.06 Kg.
$C \rightarrow CO_2 = 0,68 - 0,06 = 0,62$ Kg.
Pérdida de calor en U.C = 0,06x8100 = 486 Kcal.

Cálculo del oxígeno para el aire teórico:
O_2 del C = 0,62·(22,4/12) = 1,157 m^3
O_2 del H = 0,07·(22,4/4) = 0,392 m^3
O_2 del aire teórico = 1,157 + 0,392 – 0,063 = 1,486 m^3
Aire teórico seco = 1,486/0,21 = 7,076 m^3
Aire total seco = 7,076x1,4 = 9,906 m^3
Aire exceso seco = 9,096 – 7,076 = 2,83 m^3
H_2O en aire húmedo = 9,096·(2,5/97,5) = 0,254 m^3
H_2O en P.C = 0,04·(22,4/18) + 0,392x2 + 0,254 = 1,088 m^3
$N_2 + O_2 = 9,906x0,79 + 2,83x0,21 = 8,42\ m^3$
El contenido de calor en los P.C calientes será:
$N_2 + O_2 = 8,42·(0,302 + 2,2x10^{-5}x1200)x1200 = 3318$ Kcal.
$H_2O = 1,088·(0,373 + 5,0x10^{-5}x1200)x1200 = 565$ Kcal.
$CO_2 = 1,157·(0,406 + 9,0x10^{-5}x1200)x1200 = 714$ Kcal.
Calor que sale en los P.C = 3318 + 565 + 714 = 4597 Kcal.
Pérdida total de calor = 4597 + 486 = 5083 Kcal.
Pérdida total de calor = 5083 Kcal. (37-1.b)

EJERCICIO N°38 (7)

Se ha planeado la instalación de un horno, y se han puesto en consideración los aspectos económicos de varios tipos de hornos. En uno de los tipos investigados, se ha utilizado como combustible un gas natural de la siguiente composición, con 10% de aire en exceso:

CO	0,58%	C_2H_6	7,92%
H_2	29,03	C_2H_4	0,98
CH_4	60,70	N_2	0.79

El horno tipo B utilizó como combustible un carbón bituminoso de la siguiente composición, con 50% de aire en exceso.

C	73,00%	O	9,70%
H	5,20	H_2O	3,20
N	1,40	R	6,75
S	0,75		

El aire utilizado para la combustión en cada caso contenía 35 g. de humedad por metro cúbico de aire húmedo, medido a las condiciones bajo las cuales entra al horno. El aire entra a 20°C y 770 mm de presión.

PREGUNTAS

1. ¿Cuantos kilogramos de carbón son necesarios para proveer el mismo calor a los procesos con un metro cúbico de gas, despreciando el calor contenido en el aire?

2. Calcular la cantidad de aire (condicione dadas), requerido por cada proceso para obtener el mismo poder de calentamiento que en la pregunta 1.

3. Si los productos de combustión del horno a gas entran a la chimenea a 1000°C, ¿cómo sería el calor perdido en estos gases, comparado con la potencia calorífica del gas quemado?, además,

¿cómo sería el calor perdido en los gases de chimenea comparado con la potencia calorífica en e caso del horno a carbón?.

SOLUCION

1.

Primero calculamos la potencia calorífica del gas, con los datos proporcionados por la tabla L del Apéndice:

$CO = 3034x0,0058 = 17,60$ Kcal
$H_2 = 2582x0,2903 = 749,55$
$CH_4 = 8560x0,607 = 5195,92$
$C_2H_6 = 15110x0,0792 = 1196,71$
$C_2H_4 = 14480x0,0098 = 141,90$

Potencia calorífica del gas = 17,60 + 749,55 + 5195,92 + 1196,71 + 141,90 = 7301,68 Kca /m^3

Determinamos la potencia calorífica del carbón:

$P.C.B = 8100C + 34000\cdot(H - O/8) + 2200S - 586\cdot(9H + W)$

$P.C.B = 8100x0,73+34000\cdot(0,052-0,097/8)+2200x0,0075-586x(9x0,052+0,032) = 6997$ Kcal.

El razonamiento consiste en determinar cuantos kilogramos de carbón producirían 7302 Kcal, si 1 Kg. produce 6997 ∴

Carbón = 7302/6997 = 1,044 Kg.

Serían necesarios 1,044 Kg. de carbón (38-1)

2.

Caso A:

Debemos calcular el aire sobre la base de las reacciones que se muestran en el siguiente cuadro:

Reacciones	O_2 + Productos gaseosos (m^3/m^3 de gas)			
	O_2	H_2O	CO_2	N_2
$2CO + O_2 = 2CO_2$	0,0029	---	0,0058	---
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0.1452	0,2903	---	---
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	1.2140	1,2140	0,6070	---
$C_2H_6 + 3,5\ O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	0.2772	0,2376	0,1584	---
$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,0294	0,0196	0,0196	---
N_2	---	---	---	0,0079
Totales	1,6687	1,7615	0,7908	0,0079

Aire teórico a C.N = 1,6687/0.21 = 7,946 m^3
Aire total seco a C.N = 7,946x1,1 = 8,741 m^3

Cambiamos a las condiciones de entrada del aire:

$P_1 = 760$ mm $P_2 = 770$ mm
$T_1 = 273K$ $T_2 = 293K$
$V_1 = 8,741\ m^3$ $V_2 = ?$

$V_2 = 8,741\cdot(760/273)\cdot(293/770) = 9,26\ m^3$ de aire seco a C.D.

Cálculo del aire húmedo:

Sea X = m^3 de aire húmedo C.D

Humedad = 35X g·(1 Kg./1000 g) · (22,4 m^3/18 Kg.) = 0,0436X m^3
Aire seco C.D = X – 0,0436X = 0,9546X = 9,26 m^3 ∴
X = aire húmedo C.D = 9,26/0,9546 = 9,682 m^3

Aire húmedo C.D = 9,682 m^3 (38-2)

Caso B:

Peso total del carbón = 1,044 Kg.

C = 1,044x0,73 = 0,762 Kg.
H " 0,052 = 0,545 "
N " 0,014 = 0,01462 "

S " 0,0075 = 0,00785
H_2O " 0,032 = 0,035
R " 0,0765 = 0,0706

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$
$S + O_2 = SO_2$

Cálculo del oxígeno del aire teórico seco C.N:

O_2 del C = 0,762·(22,4/12) = 1,43 m^3
O_2 del H = 0,0545·(22,4/4) = 0,305 m^3
O_2 del S = 0,00785·(22,4/32) = 0,0055 m^3
O_2 del carbón = 1,044x0,092·(22,4/32) = 0,0715 m^3
O_2 para el aire teórico = 1,43 + 0,305 + 0,0055 – 0,0715 = 1,669 m^3
Aire teórico seco C.N = 1,669/0,21 = 7,95 m^3
Aire total seco C.N = 7,95x1,5 = 11,93 m^3

Cambio de condiciones:

V_2 = 11,93·(760/273) · (293/770) = 12,64 m^3
Aire húmedo = 12.64/0,9564 = 13,22 m^3

Aire húmedo C.D = 13,22 m^3 (38-2)

3.

Caso A:

H_2O total = 0,0436x9,682 + 1,7615 = 2,174 m^3
O_2 exceso = (8,741 – 7,946)x0,21 = 0,167 m^3
N_2 total = 8,741x0,79 + 0,0079 = 6,913 m^3

El contenido de calor de los P.C a 1000°C será:

CO_2 = 0,7908·(0,406 + 9,0x10^{-5}x1000)x1000 = 392 Kcal.
N_2 y O_2 = 7,08·(0,302 + 2,2x10^{-5}x1000)x1000 =2293 Kcal.
H_2= 2,17·(0,373 + 5,0x10^{-5}x1000)x1000 = 918 Kcal.
Calor total sacado por los P.C = 392 + 2293 + 918 = 3603 Kcal.
Pérdidas de calor = 3603/7301,68 = 0,493

Pérdidas de calor = 49,3% de la P.Calorífica (38-3)

Caso B:

H_2O total = 13,22x0,0436 + 0,035·(22,4/18) + 0,305x2 = 1,23 m^3
N_2 total = 0,01462·(22,4/28) + 11,93x0,79 = 9,44 m^3
O_2 = (11,93 – 7,95)x0,21 = 0,84 m^3

Cálculo del calor que sale en los gases:

CO_2 y SO_2 = 1,4355·(0,406 + 9,0x10^{-5}x1000)x1000 = 712 Kcal.
N_2 y O_2 = 10,28·(0,302 + 2,2x10^{-5}x1000)x1000 = 3331 Kcal
H_2O = 1,23·(0,373 + 5,0x10^{-5}x1000)x1000 = 520 Kcal.
Total calor sacado en los gases = 712 + 3331 + 520 = 4563 Kcal
Pérdidas de calor = 4563/7301,68 = 0,625

Pérdidas de calor = 62,5% de la P.C.B del carbón (38-3)

EJERCICIO N°39 (7)

Un carbón pulverizado utilizado en un horno de reverbero fue analizado como sigue:

C	68,8%	H_2O	3,2%
H	6,4	R	13,2
O	8,4		

El carbón es quemado con 40% de aire en exceso. Asumir que el carbón entra al horno a 0°C y el aire a 60°C. Los productos de combustión salen del horno a 1200°C.

Asumir que el calor específico medio del SiO_2 es 0,18 + 8,0x10^{-5}t.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del carbón.
2. El calor suministrado al horno, por kilogramo de carbón.
3. El porcentaje de este calor que es sacado del horno en:
   - (a) los productos de combustión, excluyendo el aire en exceso.
   - (b) El aire en exceso.
   - (c) Las cenizas (asumiendo que están compuestas por SiO_2, y que dejan el horno a la misma temperatura que los gases productos de la combustión).
4. Si el horno quema 2,5 toneladas métricas de carbón por hora, ¿cuantos caballos-caldera pueden ser desarrollados, por el paso de los gases a través de una caldera para pérdidas de calor, con una eficiencia térmica del 65%?

SOLUCION

1.

Si no se especifica otra cosa, siempre que se hable de potencia calorífica, nos estaremos refiriendo a la potencia calorífica baja (P.C.B).

$P.C.B = 8100C + 34000\,(H - O/8) + 2200S - 586\cdot(9H + W)$

$P.C.B = 8100x0,688 + 34000\cdot(0,064 - 0,084/8) + 0 - 586\cdot(9x0,064 + 0,032) = 7036$ Kcal.

Potencia Calorífica Baja = 7036 Kcal/Kg. (39-1)

2.

El calor suministrado al horno, vamos a representarlo así:

$Q = P + n + m$, donde:

Q = calor suministrado a horno
P = potencia calorífica
n = Calor sensible en el combustible = 0
m = Calor sensible en el aire.

Cálculo del aire:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$
O_2 del C = $0,688\cdot(22,4/12) = 1,284\ m^3$
O_2 del H = $0,064\cdot(22,4/4) = 0,3584\ m^3$
O_2 del carbón = $0,084\cdot(22,4/32) = 0,059\ m^3$
O_2 aire teórico = $1,284 + 0,3584 - 0,059 = 1,5834\ m^3$
Aire teórico(C.N) = $1,5834/0,21 = 7,54\ m^3$
Aire total C.N = $7,54x1,4 = 10,556\ m^3$

Si utilizamos los datos de la tabla XV para el calor específico del aire y los introducimos en la ecuación (4), tendremos:

$m = 10,556\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}x60)x60 = 193$ Kcal $\therefore$
$Q = 7036 + 193 = 7229$ Kcal

Calor suministrado por Kg. de carbón = 7229 Kcal. (39-2)

3.

Caso a:

$P.C = CO_2 + H_2O + N_2$(aire teórico)
$CO_2 = O_2$ del C = $1,284\ m^3$
$H_2O = 0,3584x2 + 0,032\cdot(22,4/18) = 0,7568\ m^3$
N_2 (aire teórico) = $7,45x0,79 = 5,96\ m^3$

De nuevo, aplicando a la ecuación (4) los datos de la tabla XV del Apéndice, tendremos los contenidos de calor de c/u de estos gases:

$CO_2 = 1,284\cdot(0,406 + 9,0x10^{-5}x1200)x1200 = 792$ Kcal.
$H_2O = 0,7568\cdot(0,373 + 5,0x10^{-5}x1200)x1200 = 393$ Kcal.
$N_2 = 5,96\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}x1200)x1200 = 2349$ Kcal.
Calor que sale en los P.C (sin aire exceso) = 792 + 393 + 2349 = 3534 Kcal.
Calor que sale en estos = 3534/7229 = 0,489

Calor que sale en los P.C = 48,9% (39-3.a)

Caso b:

Aire exceso = 10,556 – 7,54 = 3,016 m^3
Calor sensible en este = $3{,}016\cdot(0{,}392 + 2{,}2x10^{-5}x1200)x1200$ = 1189 Kcal.
Calor que sale en aire exceso = 1189/7229 = 0,165
Calor sacado por aire exceso = 16,5% (39-3.b)

Caso c:

Cenizas = SiO_2 = R = 0,132 Kg./Kg. de carbón.
Calor sacado por las cenizas = $0{,}132\cdot(0{,}18 + 8{,}0x10^{-5}x1200)x1200$ = 44 Kcal.
Calor sacado por las cenizas = 44/7229 = 0,006
Calor sacado por las cenizas = 0,6% (39-3.c)

4.
1 caballo-caldera = 8440 Kcal./hr.
Carbón total = 2,5 ton. = 2500 Kg.
Volvemos a calcular los productos de combustión para esta nueva referencia:
N_2 total = 10,556x0,79x2500 = 20848,1 m^3
O_2(aire exceso) = 3,016x0,21x2500 = 1583,4 m^3
$N_2 + O_2$ = 20848,1 + 1583,4 = 22431,5 m^3
CO_2 = 1,284x2500 = 3210 m^3
H_2O = 0,7568x2500 = 1892 m^3
Contenido de calor en estos gases:
CO_2 = $3210\cdot(0{,}406 + 9x10^{-5}x1200)x1200$ = 1'980.545 Kcal.
H_2O = $1892\cdot(0{,}373 + 5{,}0x10^{-5}x1200)x1200$ = 983.083
$N_2 + O_2$ = $22431{,}5\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x1200)x1200$ = 8'839.806
Total calor en P.C = 1'980.545 + 983.083+8'839.806 = 11'803.434 Kcal.
Calor utilizado en la caldera = 11'803.434x0,65 = 7'672.232 Kcal.
Caballo-caldera desarrollados = 7'672.232/8440 = 909
Caballos-caldera desarrollados a pasar los gases = 909 (39-4)

EJERCICIO N°40 (7)

Un horno open-hearth quema un gas de un productor de gas, el cual tiene la siguiente composición, usando 9000 metros cúbicos de gas por hora (medidos a 300°C):

CO	22,0%	CH_4	3,3%
CO_2	5,7	H_2O	2,6
H_2	10,5	N_2	55,9

El gas es quemado con 20% de aire en exceso. Este gas entra a las puertas del horno a 300°C y el aire utilizado para la combustión a 800°C.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire utilizado para quemar un metro cúbico de gas, ambos medidos a la temperatura dada.
2. La composición de los productos de combustión.
3. La potencia calorífica del gas, en kilocaloría por metro cúbico y en BTU por pie cúbico.
4. La cantidad de calor suministrado al horno por minuto, en kilocalorías.

SOLUCION

1.
Para calcular el aire necesario para quemar 1 m^3 de gas, utilizaremos la tabla siguiente:

Reacciones	O_2 + P.C (m^3/m^3 de gas)			
	O_2	H_2O	CO_2	N_2
$2CO + O_2 = 2CO_2$	0,1100	---	0,2200	---
CO_2	---	---	0,0570	---
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0,0525	0,1050	---	---
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,0660	0.0660	0,0330	---
H_2O	---	0,026	---	---
N_2	---	---	---	0,559
Totales	0,2285	0,1970	0,3100	0.559

Aire teórico = 0,2285/0,21 = 1,0881 m^3

Aire total = 1,0881x1,2 = 1,306 m^3

Cambio de condiciones:

V_1 = 1,396 m^3 V_2 =?

T_1 = 300+273 = 573K T_2 = 800+273 = 1073K

$V_2 = V_1 \cdot (T_2/T_1)$

V_2 = 1,306·(1073/573) = 2,45 m^3

Aire a C.D = 2,45 m^3/m^3 de gas. (40-1)

2.

Productos de combustión = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

N_2 total = 1,306x0,79 + 0,559 = 1,591 m^3

O_2 aire exceso = (1,306 – 1,088)x0,21 = 0,0458 m^3

Composición de los P.C (40-2)

Gas	Volumen (m^3)	Composición (%)
N_2	1,591	74,2
O_2	0,0458	2,1
CO_2	0,310	14,5
H_2O	0,197	9,2
	2,1438	100,0

3.

Para la potencia calorífica del gas, utilizamos los datos de la Tabla L del Apéndice:

CO = 0,22x3034 = 667,48 Kcal.

H_2 = 0,105x2582 = 271,11 "

CH_4 = 0,033x8560 = 282,48 "

P.C.B del gas = 667,48 + 271,11 + 282,48 = 1221,07

Potencia calorífica del gas = 1221 Kcal/m^3 (40-3)

Vamos a realizar una conversión de unidades:

1 ft^3 = 0,02832 m^3

1 Kcal = 3,968 BTU

P.C.B = 1221 (Kcal/m^3)·(0,02832 m^3/1 ft^3) · (3,968BTU/1 Kcal) = 137,2

Potencia calorífica del gas = 137,2 BTU/ft^3 (40-3)

Nota: A este mismo resultado se puede llegar, haciendo el cómputo sobre la base de la Tabla L del Apéndice.

4.

El calor suministrado al horno = Potencia Calorífica + Calor sensible en el gas que entra a 300°C + Calor sensible en el aire a 800°C.

Potencia calorífica del gas:

CO = 9000x0,22x3034 = 6'007.320 Kcal/hr.

H_2 = 9000x0,105x2582 = 2'439.990 "

CH_4 = 9000x0,033x8560 = 2'542.320 "

P.C.B = 6'007.320 + 2'439.990 + 2'542.320 = 10'989.630 Kcal/hr.

Calor sensible en el gas:

CO + N_2 = 9000x0,779x(0,302 + 2,2x10^{-5}x300)x300 = 609078,4 Kcal/hr

CO_2 = 9000x0,057x(0,406 + 9,0x10^{-5}x300)x300 = 66638,7 "

H_2 = 9000x0,105X(0,301 + 2,0x10^{-5}x300)x300 = 87034,5 "

CH_4 = 9000x0,033x(0,380 + 2,1x10^{-4}x300)x300 = 39471,3

$H_2O = 9000x0,026x(0,373 + 5,0x10^{-5}x300)x300 = 27237,6$ "

Calor sensible en el gas = 829460,5 Kcal/hr.

Calor sensible en el aire:

Aire total = 1,306x9000 = 11754 m^3

Calor = $11754\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}x800)x800$ = 3'005.263 Kcal/hr.

Calor suministrado = 10'989.630 + 829.460 + 3'005.263 = 14'824.353 Kcal./hr

Calor suministrado = 14'824.353/60 = 247071 Kcal/min.

Calor suministrado al horno = 247.071 Kcal/min. (40-4)

EJERCICON N°41 (7)

Un gas natural de Galveston, Tex., presenta el siguiente análisis:

CH_4	92,00%	CO_2	0,27%
H_2	2,20	H_2S	0,10
C_2H_4	0,50	O_2	0,24
CO	0,56	N_2	4,13

Este gas es utilizado como combustible en un horno para aceros open-hearth. El aire suministrado para la combustión se encuentra a una presión de 780 mm, una temperatura de 40°C y contiene 1,5% de humedad. Se utilizó 10% de aire en exceso.

Los productos de combustión entran a la chimenea a 500°C.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire húmedo realmente utilizado, a las condiciones dadas, para la combustión de un metro cúbico de gas, medido a las condiciones normales.
2. El volumen de los productos de combustión por metro cúbico de gas quemado (condiciones normales).
3. La potencia calorífica del gas, y el calor perdido en los gases que salen.
4. Si el aire hubiera sido precalentado a 1000°C., ¿Cuál hubiera sido el calor total introducido al horno por metro cúbico de gas?

SOLUCION

1.

Las reacciones, el oxígeno consumido y los productos de las reacciones se presentan en la siguiente tabla:

Reacciones	O_2 + P.C (m^3/m^3 de gas)				
	O_2	CO_2	H_2O	SO_2	N_2
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	1,8400	0,9200	1,840	---	---
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	0,0110	---	0,022	---	---
$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	0,0150	0,0100	0,010	---	---
$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	0,0028	0,0056	---	---	---
$H_2S + 1\ ½\ O_2 \rightarrow H_2O + SO_2$	0,0015	---	0,001	0,001	---
CO_2	---	0,0027	---	---	---
O_2	0,0024	---	---	---	---
N_2	---	---	---	---	0,0413
Totales	1.8727	0,9383	1,873	0,001	0,0413

Aire teórico seco (C.N) = (1,8727 – 0,0024)/0,21 = 8,91 m^3

Aire total seco (C.N) = 8,91x1,1 = 9,801 m^3
Aire húmedo (C.N) = 9,801/0,985 = 9,95 m^3

Cambio de condiciones:

P_1 = 760 mm $\quad$ P_2 = 780 mm
T_1 = 273K $\quad$ T_2 = 313K
V_1 = 9,95 m^3 $\quad$ V_2 =?

V_2 = 9,95·(760/273) · (313/780) = 11,09 m^3

Aire realmente utilizado (C.D) = 11,09 m^3 (41-1)

2.
P.C = $CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$

N_2 total = 9,801x0,79 + 0,0413 = 7,7833 m^3
O_2 (aire exceso) = (9,8 – 8,91)x0,21 = 0,187 m^3
Total H_2O = 9,95 – 9,8 + 1,873 = 2,023 m^3
Total P.C = 0,001 + 0,9383 + 2,023 + 7,7833 + 0,187 = 10,93 m^3

P.C = 10,93 m^3/m^3 de gas (41-2)

3.
la potencia calorífica se calcula con ayuda de los datos de la Tabla L del Apéndice:

CH_4 = 0,92x8560 = 7875 Kcal.
H_2 = 0,022x2582 = 57 "
C_2H_4= 0,005x14480 = 72 "
CO = 0,0056x3034 = 17 "
H_2S = 0,001x5514 = 6 "
P.C.B = 7875 + 57 + 72 + 17 + 6 = 8027 Kcal.

Potencia calorífica del gas = 8027 Kcal./m^3 (41-3)

El cálculo de la pérdida de calor en los gases se realiza, introduciendo los datos de la Tabla XV del Apéndice en la ecuación (4):

Contenido de calor en:

N_2 y O_2 = 7,97·(0,302 + 2,2x10^{-5}x500)x500 = 1247 Kcal.
CO_2 y SO_2 = 0,9393·(0,406 + 9x10^{-5}x500)x500 = 212
H_2O = 2,0323·(0,373 + 5,0x10^{-5}x500)x500 = 403
Calor que sale en P.C = 1247 + 212 + 403 = 1862 Kcal.

Pérdida de calor en P.C al salir = 1862 Kcal. (41-3)

4.
Calor introducido al horno = potencia calorífica + precalentamiento a 1000°C (aire seco + humedad del aire)

Humedad del aire = 9,95 – 9,8 = 0,15 m^3

Precalentamiento aire seco:
= 9,8·(0,302 + 2,2x10^{-5}x1000)x1000 = 3175 Kcal.

Precalentamiento humedad:
= 0,15·(0,373 + 5,0x10^{-5}x1000)x1000 = 63 Kcal
calor introducido al horno = 8027 + 3175 + 63 = 11265 Kcal.

Calor introducido = 11265 Kcal/m^3 de gas (41-4)

EJERCICIO N°42 (7)

El carbón pulverizado utilizado en un horno para cemento, tenía la siguiente composición:

C	73,6%	O	10,0%
H	5,3	R	8,5
N	1,2	H_2O	0,6
S	0,8		

PREGUNTAS

1. la potencia calorífica del carbón, ambas alta (calorimétrica) y baja (práctica).

2. la intensidad calórica, si es quemado completamente con los requerimientos de aire teórico.

3. Si el carbón fue quemado con aire en exceso, y por análisis se encontró que los productos de combustión contenían 4,5% de oxígeno libre, ¿qué porcentaje de aire en exceso se utilizó?

4. ¿Cuál sería la intensidad calórica en este caso?

SOLUCION

1.

P.C.A = 8100C + 34000·(H – 0/8) + 2200S

P.C.A = 8100x0,736 + 34000·(0,053 – 0,1/8) + 2200x0,008 = 7357 Kcal

Potencia Calorífica Alta = 7357 Kcal/Kg. de carbón (42 –1)

P.C.B = P.C.A – 586·(9H + W)

586·(9H + W) = 586·(9x0,053 + 0,006) = 283

P.C.B = 7357 – 283 = 7074 Kcal.

Potencia Calorífica Baja = 7074 Kcal/Kg. (42-1)

2.

Cuando ocurre el proceso de combustión, todo el calor introducido y/o desarrollado es absorbido por los gases productos de la combustión. Estos pues se calientan a altas temperaturas, dando lugar al fenómeno conocido como "llama".

La temperatura de la llama (**intensidad calórica**), es la máxima temperatura obtenida en la combustión.

Lo anteriormente dicho, lo podemos expresar matemáticamente de la siguiente manera:

Calor total disponible = Calor en los productos de combustión, o

Potencia calorífica + calor sensible en el combustible + calor sensible en el aire =

= Volumen de los gases x calor específico x temperatura. ∴

$$Temperatura = \frac{\text{Calor total disponible}}{\text{Volumen de gases} * \text{Calor específico}} \qquad (5)$$

Vamos a aplicar esta ecuación para calcular la intensidad calórica ó temperatura de la llama:

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$

$2H_2 + O_2 = 2H_2O$

$S + O_2 = SO_2$

Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

O del C = 0,736·(32/12) = 1,9626 Kg.

O del H = 0,053·(32/4) = 0,424 Kg.

O del S = 0,008·(32/32) = 0,008 Kg.

O del aire teórico = 1,9626 + 0,424 + 0,008 – 0,1 = 2,2946 Kg.

Aire teórico = 2,2946/0,23 = 10 Kg.

$P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2$

$CO_2 = 0,736\cdot(44/12) = 2,6987$ Kg.

H_2O total = 0,053·(18/2) + 0,006 = 0,483 Kg.

N_2 total = 10x0,77 + 0,012 = 7,712 Kg.

Haciendo uso de la Tabla XV del Apéndice

Calor en los productos de combustión:

$CO_2 = 2,7\cdot(0,205 + 4,6x10^{-5}t)\cdot t = 0,5535\ t + 12,42x10^{-5}\ t^2$

$SO_2 = 0,016\cdot(0,139 + 3,1x10^{-5}t)\cdot t = 0,0022\ t + 0,05x10^{-5}\ t^2$

$H_2O = 0,483\cdot(0,463 + 6,2x10^{-5}t)\cdot t = 0,2236\ t + 2,99x10^{-5}\ t^2$

$N_2 = 7,712\cdot(0,241 + 1,8x10^{-5}t)\cdot t = \underline{1,8586\ t + 13,88x10^{-5}\ t^2}$

Calor en P.C = $2,638\ t + 29,34x10^{-5}\ t^2$ ∴

$7074 = 2,638\ t + 29,34x10^{-5}t^2$ ∴

$t = 2161°C.$

Intensidad calórica (T° de la llama) = 2161°C (42-2)

3.

$P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2$

$CO_2 = 0,736\cdot(22,4/12) = 1,374\ m^3$

$H_2O = 0,053\cdot(22,4/2) + 0,006\cdot(22,4/18) = 0,601\ m^3$

$SO_2 = 0,008\cdot(22,4/32) = 0,006\ m^3$

$N_2 = 0,012\cdot(22,4/28) + 10x0,768\cdot(22,4/28) = 6,154\ m^3$

P.C sin aire exceso = 1,374 + 0,601 + 0,006 + 6,154 = 8,135 m^3

Aire exceso en P.C = 4,5/0,21 = 21,43%

P.C sin aire exceso = 100 – 21,43 = 78,57% = 8,135 m^3 ∴

Aire exceso = $8,135\cdot(21,43/78,57) = 2,219\ m^3$

Aire teórico = $10\cdot(22,4/29) = 7,724\ m^3$

Aire exceso = 2,219/7,724 = 0,287

Aire exceso = 28,7% (42-3)

4.

La intensidad calórica (temperatura de la llama), la calculamos sobre la base de la ecuación (5) y los datos de la Tabla XV del Apéndice.

Contenido de calor en:

N_2 y aire exceso = $8,373 \cdot (0,302 + 2,2x10^{-5}\ t) \cdot t = 2,5286\ t + 1,8424x10^{-4}\ t^2$

$H_2O = 0,601 \cdot (0,373 + 5,0x10^{-5}\ t) \cdot t = 0,2242\ t + 0,3010x10^{-4}\ t^2$

CO_2 y SO_2 = $1,38 \cdot (0,406 + 9,0x10^{-5}\ t) \cdot t = \underline{0,5603\ t + 1,2420x10^{-4}\ t^2}$

Contenido total de calor en los P.C = $3,3131\ t + 3,3850x10^{-4}\ t^2$

Así:

$3,385x10^{-4}\ t^2 + 3,313\ t = 7074$ Kcal ∴

$t = 1803°C$

Intensidad calórica = 1803°C (42-4)

EJERCICIO N°43 (7)

El análisis de un coque mostró lo siguiente:

C	89,5%
H	1,1
R	9,4

PREGUNTAS

1. La máxima temperatura teórica de la llama cuando el coque es quemado:
   a. Bajo las condiciones teóricas.
   b. Con 50% de aire en exceso.
   c. Con 10% de aire en exceso, pero con el aire precalentado a 1000°C.

SOLUCION

1.a.

El calor disponible en este caso lo constituye la potencia calorífica del carbón.

$P.C.B = 8100C + 34000\cdot(H - O/8) + 2200S - 586 \cdot (9H + W)$

$P.C.B = 8100x0,895 + 34000\cdot(0,011 - 0) + 0 - 586 \cdot (9x0,011 + 0) = 7565,5$ Kcal.

Debemos calcular los productos de combustión, para determinar el calor que ellos contienen.

$P.C = CO_2 + H_2O + N_2$

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$

$2H_2 + O_2 = 2H_2O$

Cálculo del aire teórico:

O_2 del C = $0,895\cdot(22,4/12) = 1,67\ m^3$

O_2 del H = 0,011·(22,4/4) = 0,062 m^3
O_2 para aire teórico = 1,67 + 0,062 = 1,732 m^3
Aire teórico = 1,732/0,21 = 8,248 m^3
CO_2 = 1,67 m^3
H_2O = 2x0,062 = 0,124 m^3
N_2 = 8,248x0,79 = 6,52 m^3

Contenido de calor en los P.C (ecuación 5 y Tabla XV)
$CO_2 = 1,670\cdot(0,406 + 0,00009\ t)\cdot t = 0,6780\ t + 0,0001500\ t^2$
$H_2O = 0,124\cdot(0,373 + 0,00005\ t)\cdot t = 0,0463\ t + 0,0000062\ t^2$
$N_2 = 6,520\cdot(0,302 + 0,000022\ t)\cdot t = \underline{1,9690\ t + 0,0001430\ t^2}$
Total contenido de calor en los P.C = $2,6933\ t + 0,0002992\ t^2$

$0,0002992\ t^2 + 2,6933\ t = 7566$ Kcal ∴
t = 2248°C

Temperatura de la llama = 2248°C (43-1.a)

1.b.

En este caso, dado que a los productos de combustión del caso anterior se les adiciona un exceso de aire, la temperatura de la llama debe disminuir.

Aire total = 8,248x1,5 = 12,372 m^3
Aire exceso = 12,372 – 8,248 = 4,124 m^3

Contenido de calor en este = $4,124\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}\ t)\cdot t = 1,2454\ t + 0,0000907\ t^2$
Este valor debe adicionársele al contenido de calor de los P.C encontrado en (a):

$2,6933\ t + 0,0002992\ t^2$
$\underline{1,2454\ t + 0,0000907\ t^2}$
contenido de Calor total $3,9387\ t + 0,0003899\ t^2$ ∴

$0,0003899\ t^2 + 3,9387\ t = 7566$ Kcal. ∴
t = 1651°C

Temperatura teórica de la llama = 1651°C (43 –1.b)

1.c.

En este caso, el contenido de aire en exceso es disminuye y el aire experimenta un calentamiento a 1000°C antes de entrar al horno:

Aire total = 8,248x1,1 = 9,0728 m^3

Precalentamiento del aire = $9,0728\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}x1000)x1000$ = 2940 Kcal.
Total calor disponible = 2940 + 7566 = 10506 Kcal.
Aire exceso = 9,0728 – 8,248 = 0,8248 m^3

Contenido de calor de este = $0,8248\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}\ t)\cdot t = 0,2491\ t + 0,0000181\ t^2$
Este valor debe ser adicionado al de los P.C de (a):

$2,6933\ t + 0,0002992\ t^2$
$\underline{0,2491\ t + 0,0000181\ t^2}$
Contenido de calor total en los P.C = $2,9424\ t + 0,0003173\ t^2$ ∴

$0,0003173\ t^2 + 2,9424\ t = 10506$ Kcal. ∴
t = 2753°C

Temperatura teórica de la llama = 2753°C (43-1.c)

EJRCICIO N°44 (7)

El gas de un productor de gas presentó el siguiente análisis:

CO	25,2%	CH_4	4,0%
H_2	15,3	H_2O	2,9
CO_2	5,0	N_2	47,6

PREGUNTAS

1. La intensidad calorífica teórica de este gas.
2. La temperatura teórica de la llama si el gas es quemado con 50% de aire en exceso, sin precalentamiento.

3. Lo mismo, si el gas es quemado con 10% de aire en exceso, pero ambos; aire y gas son precalentados a 1000°C.

SOLUCION

1.

Debemos calcular el aire teórico y los productos de combustión para 1 m^3 de gas, en las condiciones que muestra el cuadro que aparece en la siguiente página:

$$\text{Aire teórico} = 0{,}2825/0{,}21 = 1{,}34\ m^3$$
$$N_2\ \text{aire} = 1{,}34\text{x}0{,}79 = 1{,}059\ m^3$$
$$\text{Total}\ N_2 = 1{,}059 + 0{,}476 = 1{,}535\ m^3.$$

Reacciones	O_2 + P.C (m^3/m^3 de gas)			
	O_2	CO_2	H_2O	---
$2CO + O_2 \rightarrow CO_2$	0,1260	0,252	---	---
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	0,0765	---	0,153	---
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	0,0800	0,040	0,080	---
CO_2	---	0,050	---	---
H_2O	---	---	0,029	---
N_2	---	---	---	0,476
Totales	0,2825	0,342	0,262	0,476

Calculamos la potencia calorífica con ayuda de la Tabla L del Apéndice:

$$CO = 0{,}252\text{x}3034 = 765\ \text{Kcal.}$$
$$H_2 = 0{,}153\text{x}2582 = 385$$
$$CH_4 = 0{,}040\text{x}8560 = \underline{342\ \ }$$

Potencia calorífica total = 1502 Kcal.

Calculamos el contenido de calor en los P.C:

$$CO_2 = 0{,}342\cdot(0{,}406 + 9{,}0\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}139\ t + 3{,}078\text{x}10^{-5}\ t^2$$
$$H_2O = 0{,}262\cdot(0{,}373 + 5{,}0\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}098\ t + 1{,}310\text{x}10^{-5}\ t^2$$
$$CH_4 = 1{,}535\cdot(0{,}302 + 2{,}2\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = \underline{0{,}464\ t + 3{,}377\text{x}10^{-5}\ t^2}$$

Contenido total de calor en los P.C = $0{,}701\ t + 7{,}765\text{x}10^{-5}\ t^2$

Aplicando la ecuación (5):

$$7{,}765\text{x}10^{-5}\ t^2 + 0{,}701\ t = 1502\ \text{Kcal.}\ \therefore$$
$$t = 1785°C$$

Intensidad calorífica teórica = 1785°C (44-1)

2.

En este caso, se adiciona a los P.C, 50% de aire exceso:

$$\text{Aire total} = 1{,}34\text{x}1{,}5 = 2{,}01\ m^3$$
$$\text{Aire exceso} = 2{,}01 - 1{,}34 = 0{,}67\ m^3$$

Contenido de calor de este = $0{,}67\cdot(0{,}302 + 2{,}2\text{x}10^{-5}t)\cdot t = 0{,}202\ t + 1{,}474\text{x}10^{-5}\ t^2$

Este valor se lo adicionamos al de la pregunta (1):

Contenido de calor en los P.C = $0{,}202\ t + 1{,}474\text{x}10^{-5}\ t^2 + 0{,}701\ t + 7{,}765\text{x}10^{-5}\ t^2 =$

$$= 0{,}903\ t + 9{,}239\text{x}10^{-5}\ t^2\ \therefore$$

Aplicando la ecuación (5):

$$1502\ \text{Kcal} = 9{,}239\text{x}10^{-5}\ t^2 + 0{,}903\ t\ \therefore$$
$$t = 1450°C$$

Temperatura teórica de la llama = 1450°C (44-2)

3.

En este caso, el aire al igual que el gas son precalentados a 1000°C. El aire contiene un exceso de 10%, por tanto el calor aportado al horno aumenta, pero también aumentan los P.C; respecto al caso (1):

Total aire = 1,34x1,1 = 1,474 m^3

Calor por precalentamiento = $1{,}474\cdot(0{,}302 + 2{,}2\text{x}10^{-5}\text{x}1000)\text{x}1000$ = 477 Kcal.

Precalentamiento del gas:

$CO + N_2 = 0{,}728\cdot(0{,}302 + 2{,}2\text{x}10^{-5}\text{x}1000)\text{x}1000 = 236$ Kcal.

$H_2 = 0{,}153\cdot(0{,}301 + 2{,}0\text{x}10^{-5}\text{x}1000)\text{x}1000 = 49$

$CO_2 = 0{,}05\cdot(0{,}406 + 9{,}0\text{x}10^{-5}\text{x}1000)\text{x}1000 = 25$

$CH_4 = 0{,}04\cdot(0{,}380 + 21\text{x}10^{-5}\text{x}1000)\text{x}1000 = 23$

$H_2O = 0{,}029\cdot(0{,}373 + 5{,}0\text{x}10^{-5}\text{x}1000)\text{x}1000 = \underline{13}$

Calor por precalentamiento del gas = 346 Kcal

Total calor disponible en el horno = 1502 + 477 + 346 = 2325 kcal.

Aire exceso = 1,474 – 1,34 = 0,134 m^3

Contenido de calor de este = $0{,}134\cdot(0.302 + 2{,}2\text{x}10^{-5}t)\cdot t = 0{,}041\,t + 0{,}295\text{x}10^{-5}t^2$

Contenido de calor en los P.C = $0{,}041\,t + 0{,}295\text{x}10^{-5}t^2 + 0{,}701\,t + 7{,}765\text{x}10^{-5}\,t^2 =$

$= 0{,}742\,t + 8{,}06\text{x}10^{-5}\,t^2\ \therefore$

$8{,}06\text{x}10^{-5}\,t^2 + 0{,}742\,t = 2325$ Kcal $\therefore$

t = 2475°C

Temperatura teórica de la llama = 2475°C (44-3)

EJERCICIO N°45 (7)

El análisis de un gas natural de Findlay, Ohio; dio como resultado lo siguiente:

CH_4	93,35%
H_2	1,64
C_2H_4	0,35
N_2	4,66

Este gas fue quemado con aire (asumido seco) precalentado en regeneradores a 500°C, se utilizó 5% de aire en exceso.

PREGUNTAS

1. La intensidad calorífica una vez quemado.
2. ¿Cuánto menor es la temperatura de la llama si no se hace el precalentamiento del aire?
3. Si este gas fuera utilizado en un horno para aceros donde la máxima temperatura de la llama fuera 2100°C, ¿a qué temperatura debería ser precalentado el aire para lograr esta temperatura?

SOLUCION

1.

Utilizaremos la ecuación (5) y datos de la Tabla XV del Apéndice para realizar el cálculo de la temperatura.

Como debemos calcular el aire y los productos de combustión, hagamos uso del siguiente cuadro que muestra las reacciones, así como el oxígeno y los productos para 1 m^3 de gas quemado:

Reacciones	O_2 + P.C (m^3/m^3 de gas)			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	1,8670	0,9335	1,8670	---
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0,0082	---	0,0164	---
$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,0105	0,0070	0,0070	---
N_2	---	---	---	0,0466
Totales	1,8857	0,9405	1,8904	0,0466

El calor aportado al horno está representado por la potencia calorífica del gas y el precalentamiento del aire.

Cálculo de la potencia calorífica:

$CH_4 = 0{,}9335x8560 = 7991$ Kcal

$H_2 = 0{,}0164x2582 = 42$

$C_2H_4 = 0{,}0035x14480 = 51$

Potencia calorífica del gas = 7991 + 42 + 51 = 8084 Kcal.

Aire teórico = 1,8857/0,21 = 9,0 m^3

Aire total = 9x1,05 = 9m45 m^3

Precalentamiento del aire:

$9{,}45\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x500)x500 = 1479$ Kcal.

Total calor aportado = 8084 + 1479 = 9563 Kcal.

$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

N_2 total = 9,45x0,79 + 0,0466 = 7,51 m^3

Aire exceso = 9,45 – 9 = 0,45 m^3

O_2 aire exceso = 0,45x0,21 = 0,0945 $m^3 \cong 0{,}1\ m^3$

Contenido de calor en los productos de combustión:

N_2 y $O_2 = 7{,}61\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}\cdot t)\cdot t = 2{,}30\ t + 16{,}7x10^{-5}\ t^2$

$CO_2 = 0{,}9405\cdot(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}\cdot t)\cdot t = 0{,}38\ t + 8{,}5x10^{-5}\ t^2$

$H_2O = 1{,}8904\cdot(0{,}373 + 5{,}0x10^{-5}\cdot t)\cdot t = \underline{0{,}71\ t + 9{,}5x10^{-5}\ t^2}$

Contenido de calor en los P.C = $3{,}39\ t + 34{,}7x10^{-5}\ t^2$

$3{,}39\ t + 34{,}7x10^{-5}\ t^2 = 9563$ Kcal. ∴

t = 2290°C

Intensidad calorífica = 2290°C (45-1)

2.

Si no hay precalentamiento, el único calor aportado lo representa la potencia calorífica del gas, entonces:

$34{,}7x10^{-5}\ t^2 + 3{,}39\ t = 8084$ Kcal ∴

t = 1982°C

La temperatura de la llama será 2290 – 1982 = 308°C menor.

Sin precalentamiento, la temperatura de la llama será 308°C menor (45-2)

3.

Para cualquier temperatura, el contenido de calor en los P.C es:

$3{,}39\ t + 34{,}7x10^{-5}\ t^2$.

Si t = 2100°C, entonces:

Calor en los P.C = $3{,}39x2100 + 34{,}7x10^{-5}\cdot(2100)^2 = 8649$ Kcal.

Calor por precalentamiento del aire = 8649 – 8084 = 565 Kcal.

Contenido de calor del aire a cualquier t:

$9{,}45\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}\ t)\cdot t = 2{,}85\ t + 20{,}79\ x10^{-5}\ t^2$, así:

$20{,}79x10^{-5}\ t^2 + 1{,}85\ t = 565$ Kcal ∴

t = 192,4°C.

El aire debe ser precalentado a 192,4°C (45-3)

EJERCICIO N°46 (7)

Un gas de alto horno utilizado como combustible contiene:

CO	30%
CO_2	14
CH_4	2
N_2	54

Se acepta un 10% de aire en exceso para la combustión.

PREGUNTAS

1. La máxima temperatura teóricamente obtenible, sin precalentamiento.
2. La temperatura a la cual el gas y el aire deben ser precalentados, para producir una llama con temperatura de 3300°F. Asumir que ambos se precalientan a la misma temperatura.

SOLUCION

1.

En el cuadro que aparece en la página siguiente, se muestran las reacciones que produce 1 m^3 de gas, así como el oxígeno consumido y los gases producidos en la combustión.

Aire teórico = 0,19/0,21 = 0,905 m^3

Aire total = 0,905x1,1 = 0,9955 m^3

Aire exceso = 0,9955 – 0,905 = 0,0905 m^3

P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + aire exceso.

N_2 + aire exceso = 0,54 + 0,905x0,79 + 0,0905 = 1,346 m^3.

Reacciones	O_2 + P.C (m^3/m^3 de gas)			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2
$CO + ½ O_2 = CO_2$	0,15	0,30	---	---
CO_2	---	0,14	---	---
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,04	0,02	0.04	---
N_2	---	---	---	0,54
Totales	0,19	0,46	0,04	0,54

Contenido de calor en los gases a cualquier temperatura:

N_2 + aire exceso = $1,346\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}\, t)\cdot t = 0,4065\, t + 3,0x10^{-5}\, t^2$

CO_2 = $0,46\cdot(0,406 + 9,0x10^{-5}\, t)\cdot t = 0,1868\, t + 4,1x10^{-5}\, t^2$

H_2O = $0,04\cdot(0,373 + 5,0x10^{-5}\, t)\cdot t = \underline{0,0149\, t + 0,2x10^{-5}\, t^2}$

Contenido total de calor en los P.C = $0,6082\, t + 7,3x10^{-5}\, t^2$

Potencia calorífica del gas = 0,3x3034 + 0,02x8560 = 1081,4 Kcal.

Aplicando la ecuación (5):

$7,3x10^{-5}\, t^2 + 0,6082\, t = 1081,4$ Kcal. ∴

t = 1505,9°C

Temperatura teórica de la llama = 1505,9°C (46-1)

2.

Temperatura de la llama = (5/9)*(3300 – 32) = 1815,6°C.

Cuando t = 1815,6°C, el calor en los P.C será:

Calor en los P.C = $0,6082x1815,6 + 7,3x10^{-5}x(1815,6)^2 = 1345$ Kcal.

Precalentamiento del gas y el aire:

$N_2 + CO_2 = 0,84\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}\, t)\cdot t = 0,25368\, t + 1,848x10^{-5}\, t^2$

CO_2 = $0,14\cdot(0,406 + 9,0x10^{-5}\, t)\cdot t = 0,05684\, t + 1,260x10^{-5}\, t^2$

CH_4 = $0,02\cdot(0,380 + 21x10^{-5}\, t)\cdot t = 0,00760\, t + 0,420x10^{-5}\, t^2$

Aire = $0,9955\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}\, t)\cdot t = \underline{0,30064\, t + 2,190x10^{-5}\, t^2}$

Calor por precalentamiento gas y aire = $0,61876\, t + 5,718x10^{-5}\, t^2$

El calor aportado al horno ahora es: Potencia calorífica + precalentamiento =

$= 0,61876\, t + 5,718x10^{-5}\, t^2 + 1081,4$ ∴

$1081,4 + 0,61876\, t + 5,718x10^{-5}\, t^2 = 1345$ Kcal ∴

t = 410,5°C

Temperatura de precalentamiento = 410,5°C (46-2)

EJERCICIO N°47 (7)

El gas del ejercicio #40 es utilizado como combustible en un horno open-hearth. Se quema con 15% de aire en exceso, el aire se asume seco.

En regeneradores se precalientan ambos, aire y gas a una temperatura de 500°C.

La composición es:

CO	22,0%	CH_4	3,3%
CO_2	5,7	H_2O	2,6
H_2	10,5	N_2	55,9

PREGUNTAS

1. La temperatura producida por la combustión.
2. La temperatura que sería obtenida si el horno no tuviera regeneradores, el aire y el gas se asume que entran fríos.
3. ¿A que temperatura debería ser el gas precalentado para producir la misma temperatura que en la pregunta (1), sin precalentamiento del aire?

SOLUCION

1.

Recordemos que:

Potencia calorífica + Precalentamiento (aire y/o combustible) = calor en los productos de combustión. Esto es lo que resume la ecuación (5), por tanto nos basaremos en ella para obtener la temperatura de la llama.

Veamos las siguientes reacciones de combustión:

Reacciones	O_2 + P.C (m^3/m^3 de gas).			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2
$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	0,1100	0,220	---	---
CO_2	---	0,056	---	---
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	0,0525	---	0,105	---
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	0,0660	0,033	0,066	---
H_2O	---	---	0,026	---
N_2	---	---	---	0,559
Totales	0,2285	0.310	0,197	0,559

Aire teórico = 0,2285/0,21 = 1,08 m^3

Aire total = 1,08x1,15 = 1,242 m^3

Aire + CO + N_2(gas) = 1,242 + 0,559 + 0,22 = 2.021 m^3

Precalentamiento del aire y el gas (para el calor específico, ver Tabla XV del Apéndice):

Aire + CO + N_2(gas) = 2,021·(0,302 + 2,2x10^{-5}x500) · 500 = 316 Kcal

CO_2(gas) = 0,057·(0,406 + 9,0x10^{-5}x500) · 500 = 25

H_2 = 0,105·(0,301 + 2,0x10^{-5}x500) · 500 = 17

CH_4 = 0,033·(0,380 + 21x10^{-5}x500) · 500 = 8

H_2O = 0,026·(0,373 + 5,0x10^{-5}x500) · 500 = 5

Calor total por precalentamiento de aire y gas = 371 Kcal.

Potencia calorífica del gas (Ver Tabla L del Apéndice):

CO = 0,22x3034 = 668 Kcal

H_2 = 0,105x2582 = 271 "

CH_4 = 0,033x8560 = 283 "

Potencia calorífica del gas = 668 + 271 + 283 = 1222 Kcal/m^3

Total calor disponible = 1222 + 371 = 1593 Kcal.

Vamos a calcular el contenido de calor de los productos de combustión a cualquier temperatura:

P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2

Total N_2 = 1,242x0,79 + 0,559 = 1,54 m^3

Aire exceso = 1,242 – 1,08 = 0,162 m^3

O_2 aire exceso = 0,162x0,21 = 0,034 m^3
$N_2 + O_2$ = 1,54 + 0,034 = 1,574 m^3

Calor en los P.C, a cualquier temperatura:

$N_2 + O_2 = 1{,}574\cdot(0{,}302 + 2{,}2\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}475\ t + 3{,}46\text{x}10^{-5}\ t^2$
$CO_2 \quad = 0{,}310\cdot(0{,}406 + 9{,}0\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}126\ t + 2{,}79\text{x}10^{-5}\ t^2$
$H_2O \quad = 0{,}197\cdot(0{,}373 + 5{,}0\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = \underline{0{,}074\ t + 0{,}99\text{x}10^{-5}\ t^2}$
Calor en los P.C a cualquier t = $0.675\ t + 7{,}24\text{x}10^{-5}\ t^2$

1593 Kcal. = $0{,}675\ t + 7{,}24\text{x}10^{-5}\ t^2\ \therefore$
t = 1935°C

Temperatura producida por la combustión = 1935°C (47-1)

2.

Si el aire y/o el gas no experimentan ningún precalentamiento, entonces el calor disponible se limita únicamente a la potencia calorífica del combustible, de modo que la temperatura de la llama será menor:

1222 0 $0{,}675\ t + 7{,}24\text{x}10^{-5}\ t^2\ \therefore$
t = 1550°C

Temperatura de la llama = 1550°C (47-2)

3.

Calor por precalentamiento = 371 Kcal.
Contenido de calor del gas a cualquier temperatura:

$CO + N_2 = 0{,}779\cdot(0{,}302 + 2{,}2\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}235\ t + 1{,}71\text{x}10^{-5}\ t^2$
$CO_2 = \quad 0{,}057\cdot(0{,}406 + 9{,}0\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}023\ t + 0{,}51\text{x}10^{-5}\ t^2$
$H_2 = \quad 0{,}105\cdot(0{,}301 + 2{,}0\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}032\ t + 0{,}21\text{x}10^{-5}\ t^2$
$H_2O = \quad 0{,}026\cdot(0{,}373 + 5{,}0\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}010\ t + 0{,}13\text{x}10^{-5}\ t^2$
$CH_4 = \quad 0{,}033\cdot(0{,}380 + 21\text{x}10^{-5}\ t)\cdot t = \underline{0{,}013\ t + 0{,}69\text{x}\ 10^{-5}\ t^2}$
Calor en el gas a cualquier temperatura = $0{,}313\ t + 3{,}25\text{x}10^{-5}\ t^2$

$371 = 0{,}313 + 3{,}25\text{x}10^{-5}\ t^2\ \therefore$
t = 1067°C

Temperatura de precalentamiento del gas = 1067°C (47-3)

EJERCICIO N°48 (7)

Un horno de reverbero para refinación utiliza un aceite que contiene:

C	86%
H	14

Este aceite tiene una potencia calorífica de 10932 Kcal/Kg.
Los gases que salieron del horno, presentaron el siguiente análisis:

N_2	75,0%	H_2O	10,1%
CO_2	10,3	O_2	4,6

Y poseen una temperatura de 1200°C.

Los gases pasan del horno a una caldera para pérdidas de calor, la cual opera a una eficiencia del 60%. Dejan la caldera a 400°C.

PREGUNTAS

1. El volumen total de los gases que salen del horno por kilogramo de carbón quemado, medido a 1200°C.
2. El porcentaje de la potencia calorífica del aceite que es sacado del horno por los gases.
3. Los kilogramos de agua evaporados en la caldera, por kilogramo de aceite quemado, al equivalente de 539 Kcal. requeridas para evaporar 1 Kg. de agua.

4. El porcentaje del calor dejado por los gases en su paso a través de la caldera, y que es utilizado para hacer vapor.

SOLUCION

1.
vamos a utilizar la siguiente expresión:

$$m^3 \text{ de gas} = \frac{\text{C total en gas}}{\text{C}/m^3 \text{ de gas}} \qquad (6)$$

C en 1 Kg. de aceite = 0,86 Kg.
En 1 m^3 de gas hay 0,103 m^3 de CO_2
C/m^3 de gas = 0,103·(12/22,4) = 0,055 Kg.
m^3 de gas = 0,86/0,055 = 15,64 m^3 (C.N)
Realizamos el cambio de condiciones:
$T_1 = 273K \quad T_2 = 1200 + 273 = 1473K$
$V_1 = 15,64\ m^3 \quad V_2 = ?$
$V_2 = V_1 \cdot (T_2/T_1) \therefore$
$V_2 = 15,64 \cdot (1473/273) = 84,2\ m^3$
Volumen total de P.C = 84,2 m^3/Kg. de aceite (48-1)

2.
Productos de combustión por Kg. de aceite quemado:
N_2 = 15,64x0,75 = 11,73 m^3
CO_2 = 15,64x0,103 = 1,61 m^3
H_2O = 15,64x0,101 = 1,58 m^3
O_2 = 15,64x0,046 = 0.72 m^3
Total productos de combustión (C.N) = 15,64 m^3
Cálculo del calor que sale en los gases (ver Tabla XV del Apéndice):
$N_2 + O_2 = 12,45 \cdot (0,302 + 2,2x10^{-5}x1200) \cdot 1200 = 4905$ Kcal
$CO_2 = 1,61 \cdot (0,406 + 9,0x10^{-5}x1200) \cdot 1200 =$ 992
$H_2O = 1,58 \cdot (0,373 + 5,0x10^{-5}x1200) \cdot 1200 =$ 808
Calor que sale en los productos de combustión = 6705 Kcal
Calor que sale = 6705/10932 = 0,613
Calor que sale en P.C = 61,3% de la P.C.B del aceite (48-2)

3.
calor efectivo de la caldera = 6705x0,60 = 4203 Kcal
Kg. de agua evaporados = 4203/539 = 7,5
Agua evaporada en la caldera = 7,5 Kg. (48-3)

4.
Calor sensible de los P.C a 400°C:
$N_2 + O_2 = 12,45 \cdot (0,302 + 2,2x10^{-5}x400) \cdot 400 = 1548$ Kcal.
$CO_2 = 1,61 \cdot (0,406 + 9,0x10^{-5}x400) \cdot 400 =$ 284
$H_2O = 1.58 \cdot (0,373 + 5,0x10^{-5}x400) \cdot 400 =$ 249
Total calor sensible de los P.C a 400°C = 2081 Kcal.
Calor efectivo de la caldera = 6705x0,6 = 4023 Kcal.
Calor dejado = 6705 – 2081 = 4624 Kcal.
Calor utilizado en hacer vapor = 4023/4624 = 0,87
Calor utilizado en hacer vapor = 87% del calor dejado (48-4)

EJERCICIO N°49 (7)

Un horno regenerativo open-hearth utiliza gas como combustible. El gas es quemado con 10% de aire en exceso.

La temperatura del aire y del gas un instante antes de la combustión promedia 800°C, mientras que la temperatura a la entrada de los recuperadores promedia 1400°c y a su salida 600°C. De los regeneradores los productos de combustión pasan a la chimenea.

La composición del gas es la siguiente:

CO	22%	CH_4	2%
CO_2	8	H_2O	4
H_2	11	N_2	53

PREGUNTAS

1. El promedio teórico de la temperatura de la llama.
2. La eficiencia de la regeneración.
3. El porcentaje del calor total que entra al horno que se pierde en los gases de la chimenea, y cual sería este porcentaje si no se usan recuperadores.

SOLUCION

1.

calor disponible = calor en los productos de combustión.

Calor disponible = potencia calorífica + calor por precalentamiento (aire y gas).

Potencia calorífica del combustible:

$CO = 0,22x3034 = 667,48$ Kcal

$H_2 = 0,11x2582 = 284,02$

$CH_2 = 0,02x8560 = \underline{171,20}$

Potencia calorífica = 1122,70 Kcal.

Cálculo del aire:

Reacciones de Combustión:

$2C + O_2 = 2CO_2$: $O_2 = 0,22/2 = 0,110\ m^3$

$2H_2 + O_2 = 2H_2O$: $O_2 = 0,11/2 = 0,055\ m^3$

$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$: $O_2 = 2x0,02 = \underline{0,040\ m^3}$

O_2 del aire teórico = $0,205\ m^3$

Aire teórico = $0,205/0,21 = 0.976\ m^3$

Aire exceso = $0,976x0,1 = 0,0976\ m^3$

Aire total = $0,976 + 0,0976 = 1,0736\ m^3$

Productos de combustión = $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$

$CO_2 = 0,08 + 0,22 + 0,02 = 0,32\ m^3$

$H_2O = 0,04 + 0,11 + 0,04 = 0,19\ m^3$

O_2 exceso = $0,0976x0,21 = 0,02\ m^3$

$N_2 = 0,53 + 1,0736x0,79 = 1,35\ m^3$

Precalentamiento del aire y del gas a 800°C:

Aire + N_2 + CO = $1,0736 + 0,53 + 0,22 = 1,8236\ m^3$

Aire + N_2 + CO = $1,8236\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}x800)\cdot 800 = 457$ Kcal.

$CO_2 = 0,08\cdot(0,406 + 9,0x10^{-5}x800)\cdot 800 =$ 31

$H_2 = 0,11\cdot(0,301 + 2,0x10^{-5}x800)\cdot 800 =$ 28

$CH_4 = 0,02\cdot(0,380 + 21x10^{-5}x800)\cdot 800 =$ 9

$H_2O = 0,04\cdot(0,373 + 5,0x10^{-5}x800)\cdot 800 =$ $\underline{13}$

Calor total del precalentamiento = 538 Kcal.

Total calor disponible = 1123 + 538 = 1661 Kcal.

Contenido de calor en los productos de combustión a cualquier temperatura:

$N_2 + O_2 = 1{,}37\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}414\ t + 0{,}0000301\ t^2$

$H_2O = 0{,}190\cdot(0{,}373 + 5{,}0x10^{-5}\ t)\cdot t\ = 0{,}071\ t + 0.0000095\ t^2$

$CO_2 = 0{,}320\cdot(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}\ t)\cdot t\ = \underline{0{,}130\ t + 0{,}0000288\ t^2}$

Total calor en los productos de combustión $t = 0{,}615\ t + 0.0000684\ t^2$

$0{,}0000684\ t^2 + 0{,}615\ t = 1661$ Kcal. $\therefore$

$t = 2175°C$

Temperatura de la llama = 2175°C (49-1)

2.

En el precalentamiento del aire y del gas se utilizan 538 Kcal.

Calor en el aire y el gas a cualquier temperatura:

$Aire{+}N_2{+}CO = 1{,}8236\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}\ t)\cdot t = 0{,}540\ t + 0{,}0000393\ t^2$

$CO_2 = 0{,}08\cdot(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}\ t)\cdot t\ = 0{,}320\ t + 0{,}0000072\ t^2$

$H_2 = 0{,}11\cdot(0{,}301 + 2{,}0x10^{-5}\ t)\cdot t\ = 0{,}033\ t + 0{,}0000220\ t^2$

$CH_4 = 0{,}02\cdot(0{,}380 + 21x10^{-5}\ t)\cdot t\ = 0{,}008\ t + 0{,}0000042\ t^2$

$H_2O = 0{,}04\cdot(0{,}373 + 5{,}0x10^{-5}\ t)\cdot t\ = \underline{0{,}015\ t + 0{,}0000020\ t^2}$

Aire y gas aire a cualquier temperatura $= 0{,}628\ t + 0{,}0000549\ t^2$

Cuando $t = 400°C$:

Calor de precalentamiento = 987,2 Kcal. $\therefore$

Eficiencia = 538/987,2 = 0,545

Eficiencia = 54,5% (49-2)

3.

Contenido de calor en los P.C a cualquier temperatura $= 0{,}615\ t + 0{,}0000684\ t^2$

Si $t = 600°C$

Calor en P.C = 393 Kcal.

Calor perdido = 393/1661 = 0,237

Pérdida de calor en gases a 600°C = 23,7% (49-3)

Si no hay recuperadores, los gases salen por la chimenea a 1400°C:

Si $t = 1400°C$:

Calor en gases = 995 Kcal

Pérdida = 995/1661 = 0,599

Pérdidas de calor = 60% (49-3)

EJERCICIO Nº50 (7)

La composición de un gas de alto horno es la siguiente:

CO	24%	CO_2	13%
H_2	2	H_2O	4
N_2	57		

Este gas es quemado en un horno regenerativo para fundir hierro, utilizando los requerimientos teóricos de aire, el cual contiene 2% de humedad. Tanto el gas como el aire son precalentados a 600°C y se produce una temperatura de combustión de 1600°C.

Por cada 200 kilogramos de hierro fundido, se queman 1000 m^3 de gas.

El calor en el hiero a la temperatura del baño es de 350 Kcal/Kg.

Los productos de combustión al salir del horno (entrada a los regeneradores), la temperatura ha caído a 1100°C y salen de los regeneradores a 500°C (ver figura 1).

PREGUNTAS

1. El porcentaje del calor original disponible que se perdió en la combustión, los porcentajes del mismo utilizados y perdidos en el propio horno, los porcentajes utilizados y perdidos en los regeneradores y el porcentaje perdido en las chimeneas de los gases.

2. Las eficiencias térmicas del propio horno y de los regeneradores.

SOLUCION

1.

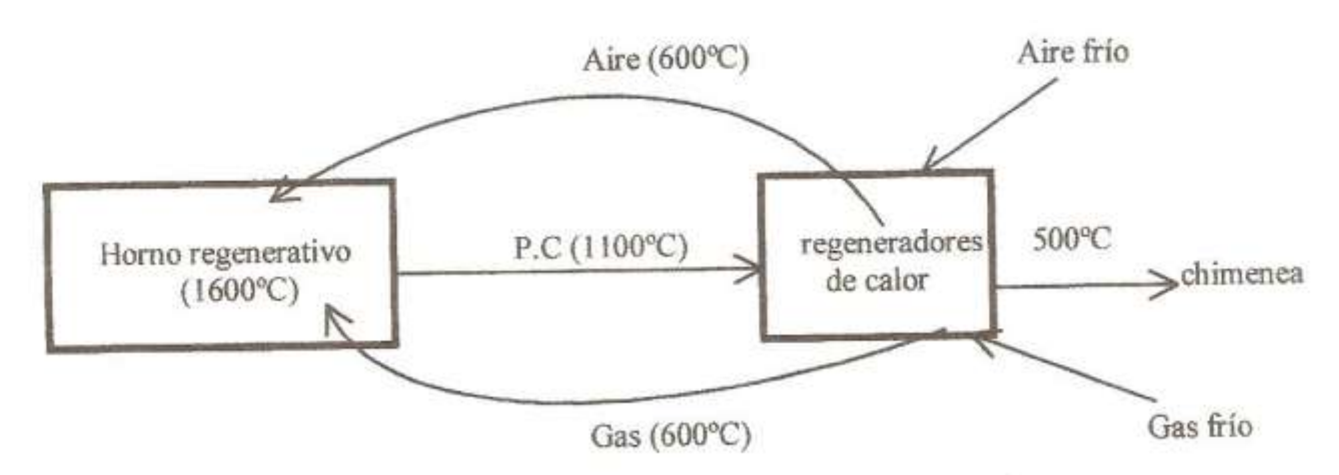


Figura N°1: Horno Regenerativo con Sistema de Recuperación de Calor

Reacciones de combustión:

$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$: $O_2 = 0{,}24x0{,}5 = 0{,}12\ m^3$

$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$: $O_2 = 0{,}02x0{,}5 = \underline{0{,}01\ m^3}$

Total O_2 requerido = $0{,}13\ m^3$

Aire teórico seco = 0,13/0,21 = 0,619 m^3

Aire teórico húmedo = 0,619x1,02 = 0,631 m^3

Humedad del aire = 0,631 – 0,619 = 0,012 m^3

Potencia calorífica del gas:

CO =0,24x3034 = 728,16 Kcal

H_2 = 0,02x2582 = $\underline{51{,}64\ Kcal}$

Total P.C.B = 779,80 Kcal/m^3

Precalentamientos:

Gas:

$CO + N_2 = 0{,}81\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x600)\cdot 600 = 153{,}21$ Kcal

$CO_2 = 0{,}13\cdot(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}x600)\cdot 600 = 35{,}91$

$H_2O = 0{,}04\cdot(0{,}373 + 5{,}0x10^{-5}x600)\cdot 600 = 9{,}72$

$H_2 = 0{,}02\cdot(0{,}301 + 2{,}0x10^{-5}x600)\cdot 600 = \underline{3{,}74}$

Total precalentamiento del gas = 202,38 Kcal/m^3

Aire:

Aire teórico = $0{,}619\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x600)\cdot 600 = 117{,}10$ Kcal

Humedad = $0{,}012\cdot(0{,}373 + 5{,}0x10^{-5}x600)\cdot 600 = \underline{2{,}92\ Kcal}$

Total precalentamiento aire húmedo = 120,02 Kcal

Total calor disponible original = 779,80 + 202,4 + 120 = 1102,2 Kcal

Productos de combustión = $CO_2 + H_2O + N_2$

$CO_2 = 0{,}24 + 0{,}13 = 0{,}37\ m^3$

$H_2O = 0{,}02 + 0{,}04 + 0{,}012 = 0{,}072\ m^3$

$N_2 = 0{,}57 + 0{,}619x0{,}79 = 1{,}059\ m^3$

Calor en productos de combustión a 1600°C:

$CO_2 = 0{,}370\cdot(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}x1600)\cdot 1600 = 325{,}60$ Kcal

$H_2O = 0{,}072\cdot(0{,}373 + 5{,}0x10^{-5}x1600)\cdot 1600 = 52{,}20$ Kcal

$N_2 = 1{,}059\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x1600)\cdot 1600 = \underline{571{,}30\ Kcal}$

Calor total en productos de combustión = 949,10 Kcal

Calor en productos de combustión a 1100°C:

$CO_2 = 0{,}370\cdot(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}x1100)\cdot 1100 = 205{,}5$ Kcal

$H_3O = 0{,}072\cdot(0{,}373 + 5{,}0x10^{-5}x1100)\cdot 1100 = 33{,}9$ Kcal

$N_2 = 1{,}059\cdot(0{,}303 + 2{,}2x10^{-5}x1100)\cdot 1100 = \underline{380{,}0\ Kcal}$

Total calor en P.C a 1100°C = 619,4 Kcal

Calor en productos de combustión a 500°C:

$CO_2 = 0,370\cdot(0,406 + 9,0x10^{-5}x500)\cdot 500 = 83,435$ Kcal

$H_2O = 0,072\cdot(0,373 + 5,0x10^{-5}x500)\cdot 500 = 14,325$ Kcal

$N_2 = 1,059\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}x500)\cdot 500 = \underline{165,736}$ Kcal

Total calor en P.C a 500°C $= 263,496$ Kcal

Calor en hierro fundido por de gas = 350·(200/1000) = 70 Kcal

Calor original perdido en la combustión = 1102,2 – 949,1 = 153,1 Kcal

Calor original perdido en la combustión = 153,1/1102,2 = 0,139

Calor perdido en combustión = 13,9% (50-1)

Calor utilizado en el horno = 70/1102,2 = 0,063

Calor utilizado en el horno = 6,3% (50-1)

El calor perdido en el propio horno = calor original – calor que sale en P.C –calor perdido en la combustión – contenido de calor en el hierro fundido:

Calor perdido en el horno = 1102,2 – 619,4 – 153,1 – 70 = 259,7 Kcal

Calor perdido en el horno = 259,7/1102,2 = 0,235

Calor perdido en el horno = 23,5% (50-1)

Calor utilizado en los regeneradores para el precalentamiento del aire y el gas =

= 120,02 + 202,38 = 322,4 Kcal

Calor utilizado en regeneradores = 322.4/1102,2 = 0,293

Calor utilizado en regeneradores = 29,3% (50-1)

Calor perdido en regeneradores = Calor que entra en los P.C – calor utilizado en precalentamientos – calor de salida de los P.C:

Calor perdido en regeneradores = 619,4 – 322,4 – 263,4 = 33,6 Kcal

Pérdida en regeneradores = 33,6/1102,2 = 0,0305

Pérdida en regeneradores = 3,05% (50-1)

Pérdidas en chimenea = 263,4/1102,2 = 0,239

Pérdidas en chimenea = 23,9% (50-1)

2.

La eficiencia del horno se puede calcular en función del calor total del horno, o en función del calor de combustión:

En función de calor total:

Eficiencia = 70/1102,2 = 0,064

Eficiencia = 6,4% (50-1)

En función del calor de combustión:

Eficiencia = 70/949,1 = 0,074

Eficiencia = 7,4% (50-1)

Eficiencia de los regeneradores = 322,4/619,4 = 0,521

Eficiencia de los regeneradores = 52,1% (50-1)

EJERCICIO Nº51 (7)

Un horno para aceros open-hearth de la Bethlehem Steel Co. Es calentado con alquitrán de horno de coque, el cual tiene la siguiente composición:

C	87,8%	N	1,1%
H	5,6	S	0,6
O	2,2	H_2O	2,7

La gravedad específica del alquitrán es 1,14.

Este alquitrán en el quemador tiene una temperatura de 190°F, y es atomizado con 0,42 libras de vapor por libra de alquitrán.

La temperatura del vapor es de 550°F.

El aire precalentado para la combustión (asumido seco), entra a las puertas a 1900°F.

Los productos de combustión contienen 1,5% de oxígeno, análisis seco. Ellos dejan el horno y entran a los recuperadores de calor a 2750°F.

Asumir que el calor específico del alquitrán es 0,24.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica neta del alquitrán, en BTU/galón.

2. Los pies cúbicos de aire seco a condiciones normales utilizados por libra de alquitrán, y el porcentaje de aire en exceso, asumiendo que toda la combustión es por aire (v.g. despreciando la combustión por vapor).

3. El calor total suministrado al horno, por libra de alquitrán quemado.

4. El calor sacado del horno por los gases calientes, incluyendo el vapor con estos gases; pero despreciando los gases resultantes de la carga en el horno.

5. La eficiencia de regeneración de los recuperadores, considerando solamente el calor en los gases, como en la pregunta 4; y asumiendo que los recuperadores calientan los gases que entran a 19003°F.

6. La temperatura máxima de la llama en los quemadores.

SOLUCION

1.

Para este cálculo utilizamos la fórmula de Dulong, en la forma:

BTU/libra = 14600C + 61000·(H – O/8) + 4000S – 1050·(9H + W)

BTU/lb = 14600x0,878 + 61000·(0,056 – 0,022/8) + 4000x0,006 – 1050·(9x0,056 + 0,027)

BTU/lb = 15533,5

1 galón = 10,142 lbs.

BTU/galón = 15533,5x10,142 = 157541

BTU/galón = 157541 (51-1)

2.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$: $O_2 = 0,878\cdot(359/12) = 26,267\ ft^3$

$H_2 + ½\ O_2 = H_2O$: $O_2 = 0,056\cdot(359/4) = 5,026$

$S + O_2 = SO_2$: $O_2 = 0,006\cdot(359/32) = 0,067\ ft^3$

Oxígeno de reacciones: $= 31,360\ ft^3$

O_2 aire teórico = 31,26 – 0,022·(359/32) = 31,113 ft^3

Aire teórico = 31,113/0,21 = 148,157 ft^3

P.C sin aire exceso = $CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2$

$N_2 = 148,157x0,79 + 0,011\cdot(359/28) = 117,185\ ft^3$

$H_2O = 2x5,026 + 0,027\cdot(359/18) = 10,591\ ft^3$

$CO_2 = O_2$ del C $= 26,267\ ft^3$

$SO_2 = O_2$ del S $= 0,067\ ft^3$

P.C total sin aire exceso = 154,110 ft^3

Aire exceso en productos de combustión = 1,5/0,21 = 7,14%

P.C sin aire exceso = 100 – 7,14 = 92,86% = 154,110 ft^3

P.C total = 154,110/0,9286 = 165,96 ft^3

Aire exceso = 165,96 – 154,11 = 11,85 ft^3

Aire total = 148,157 + 11,85 = 160,007 ft^3

Aire total = 160 ft^3/lb. De alquitrán (51-2)

Aire exceso = 11,85/160,007 = 0.074

Aire exceso = 7,4% (51-2)

3.

Conversión de temperaturas: °F → °C:

°C = (5/9)x(°F – 21) ∴

190°F = 87,8°C

550°F = 287,8°C

1900°F = 1037,8°C

2750°F = 1510°C

Precalentamientos:

Recordar la ecuación (4):
Contenido de calor = cantidad x calor específico x temperatura:
Precalentamiento Alquitrán = 1x0,24x87,8 = 21,072 lb-cal · (1,83 BTU/1 lb-cal.) = 37,93 BTU
Precalentamiento Vapor = 0,42·(0,463 + 6,2x10^{-5}x287,8) x287,8 x1,8 = 104,62 BTU
Aire = 160 ft^3x(29 lb/359 ft^3) = 12,92 lb.
Precalentamiento aire = 12,92·(0,234 + 1,73x10^{-5}x1037,8)x1037,8x1,8 = 6081 BTU
Potencia calorífica = 1x15533,5 = 15533,5 BTU

Calor total suministrado = 37,93 + 104,62 + 6081 + 15533,5 = 21757,05

Calor total suministrado = 21757 BTU/lb. Alquitrán (51-3)

4.

Productos de combustión:

H_2O total = 10,591 + 0,42·(359/18) = 18,968 ft^3 = 0,951 lb
CO_2 = 26,267·(44/359) = 3,219 lb
SO_2 = 0,067·(64/359) = 0,012 lb
N_2 = 117,185 + 11,65x0,79 = 126,547 ft^3 = 9,870 lb
O_2 = 11,85x0,21 = 2,489 ft^3 = 0,222 lb.

Calor sacado en los P.C a 2570°F (1510°C):

CO_2 = 3,219·(0,205 + 4,6x10^{-5}x1510)x1510 = 1334 lb-cal/lb
H_2O = 0,951·(0,463 + 6,2x10^{-5}x1510)x1510 = 799 "
SO_2 = 0,012·(0,139 + 3,1x10^{-5}x1510)x1510 = 3,4 "
N_2 = 9,870·(0,241 + 1,8x10^{-5}x1510)x1510 = 3997 "
O_2 = 0,222·(0,211 + 1,56x10^{-5}x1510)x1510 = 79 "

Calor sacado por los gases = 6212 lb-cal/lb

Calor en los gases calientes = 6212 lb-cal·(1,8BTU/lb-cal) = 11182 BTU

Calor sacado por los P.C calientes = 11182 BTU (51-4)

5.

Calor que entra a los recuperadores = 11182 BTU
Calor utilizado en precalentamiento del aire = 6081 BTU

Eficiencia = 6081/11182 = 0,544

Eficiencia de los recuperadores = 54,4% (51-5)

6.

Calor total suministrado al horno por libra de alquitrán = 21757/1,8 = 12087 lb-cal.
Cálculo del contenido de calor en los P.C a cualquier temperatura:

CO_2 = 3,219·(0,205 + 4,6x10^{-5} t) · t = 0,6599 t + 1,48x10^{-4} t^2
H_2O = 0,951·(0,463 + 6,2x10^{-5} t) · t = 0,4403 t + 5,90x10^{-5} t^2
SO_2 = 0,012·(0,139 + 3,1x10^{-5} t) · t = 0,0017 t + 3,72x10^{-7} t^2
N_2 = 9,870·(0,241 + 1,8x10^{-5} t) · t = 1,3787 t + 1,78x10^{-4} t^2
O_2 = 0,222·(0,211 + 1,6x10^{-5} t) · t = 0,0468 t + 3,89x10^{-4} t^2

Σ = 3,5274 t + 3,89x10^{-4} t^2

3,89x10^{-4} t^2 + 3,5274 t = 12087 lb-cal ∴
t = 2651°C

Temperatura de la llama en los quemadores = 2651°C = 4083,8°F (51-6)

EJERCICIO N°52 (7)

Un horno open-hearth es calentado con aceite crudo de Texas, el cual analizó lo siguiente:

C	84,6%	O_2	2,9%
H_2	10,9	S	1,6

La gravedad específica del aceite es 0,90.
Se utiliza un 20% de aire en exceso.

Los productos de combustión salen del horno y entran a los regeneradores a 1600°C. Dejan los regeneradores y entran a una caldera para pérdidas de calor a 700°C, dejan la caldera y pasan a la chimenea a 200°C.

Los regeneradores precalientan el aire a 1000°C. La caldera desarrolla ¼ caballo-caldera, por kilogramo de aceite quemado por hora.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del aceite en Kcal/Kg., calculada por la fórmula de Dulong.
2. La potencia calorífica del aceite, en BTU/galón.
3. El calor dejado por los productos de combustión, por kilogramo de aceite quemado en:
   a. En el horno.
   b. En los regeneradores
   c. El la caldera
   d. Pérdidas en las chimeneas.
4. La eficiencia de los regeneradores y de la caldera.

SOLUCION

1.

Fórmula de Dulong:

P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)

P.C.B = 8100x0,846 + 34000·(0,109 – 0,029/8) + 2200x0,016 – 586·(9x0,109 + 0)= = 9896

Potencia calorífica del aceite = 9896 Kcal/Kg. (52-1)

2.

1 Kg. de aceite = 1/0,9 = 1,11 m^3

1 galón = 3,7854 litros.

9896·(Kcal/Kg.) · (3,968 BTU/Kcal.) · (1 Kg./1,11 m^3) · (1 m^3/1000 lts.) · (3,7854 lts/1 galón) = 133,912 BTU/galón

Potencia calorífica del aceite = 133,912 BTU/galón (52-2)

3.

La trayectoria realizada por los gases es similar a la esquematizada en la Fig.#1 del ejercicio #50, solo que en este caso, al salir los gases de los regeneradores entran a una caldera para pérdidas de calor, y de allí es cuando salen a las chimeneas.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$:	$O_2 = 0,846\cdot(22,4/12) = 1,5792\ m^3$
$H_2 + ½\ O_2 = H_2O$:	$O_2 = 0,109\cdot(22,4/4) = 0,6104\ m^3$
$S + O_2 = SO_2$:	$O_2 = 0,016\cdot(22,4/32) = \underline{0,0112\ m^3}$
$\Sigma(O_2$ reacciones):	$= 2,2008\ m^3$

O_2 del combustible = 0,029·(22,4/32) = 0,0203 m^3

O_2 del aire teórico seco = 2,2008 – 0,0203 = 2,1805 m^3

Aire teórico = 2,1805/0,21 = 10,38 m^3

Aire total = 10,38x1,2 = 12,46 m^3.

Cálculo de los productos de combustión:

N_2 = 12,46x0,79 =	8,8434 m^3
CO_2=	1,5792 m^3
H_2O = 2x0,6104 =	1,2208 m^3
SO_2 =	0,0112 m^3
O_2 = (12,46 –10,38)x0,21 =	0,4308 m^3

Contenido de calor de los gases a cualquier temperatura:

$N_2 + O_2 = 10,2802\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}\ t) \cdot t = 3,1046\ t + 2,262x10^{-4}\ t^2$

$CO_2+SO_2 = 1,5904\cdot(0,406 + 9,0x10^{-5}\ t) \cdot t = 0,6457\ t + 1,431x10^{-4}\ t^2$

$H_2O = 1,2208\cdot(0,373 + 5,0x10^{-5}\ t) \cdot t = \underline{0,4553\ t + 0,610x10^{-4}\ t^2}$

$\Sigma = 4,2956\ t + 4,303x10^{-4}\ t^2$

Sea: Q = contenido de calor.

$$Q = 5{,}2956\,t + 4{,}303\times10^{-4}\,t^2:$$

Si:

t = 1600°C, Q = 7831 Kcal
t = 700°C, Q = 3555 Kcal.
t = 200°C, Q = 859 Kcal.

En la caldera:
1 caballo-caldera = 8440 Kcal por hora.
Calor desarrollado en la caldera = ¼ x8440 = 2110 Kcal.

Precalentamiento del aire a 1000°C:
$= 12{,}46\cdot(0{,}302 + 2{,}2\times10^{-5}\times1000)\cdot 1000 = 4037$ Kcal
Total calor disponible = 4037 + 9896 = 13933 Kcal.

a.
calor dejado en el horno:
$Q_1 = 13933 - 7831 = 6102$ Kcal.
Calor dejado en el horno = 6102 Kcal (52-3.a)

b.
calor dejado en los regeneradores:
$Q_2 = 7831 - 3155 = 4676$ Kcal.
Calor dejado en los regeneradores = 4676 Kcal (52-3.b)

c.
Calor dejado en la caldera:
$Q_3 = 3155 - 859 = 2296$ Kcal
Calor dejado en la caldera = 2296 Kcal. (52-3.c)

d.
Pérdidas en las chimeneas:
$Q_4 = 859$ Kcal.
Pérdidas en las chimeneas = 859 Kcal (52-3,d)

4.
La eficiencia térmica es la relación entre el calor útil y el calor disponible o aportado al sistema, por tanto:

Eficiencia en los regeneradores = 4037/7831 = 0,516
Eficiencia en regeneradores = 51,6% (52-4)

Eficiencia en la caldera = 2110/3155 = 0,67
Eficiencia en la caldera = 67,0% (52-4)

EJERCICIO N°53 (7)

El coque utilizado como combustible en un horno de crisol, analizó lo siguiente:

C	85,8%
H_2O	9,8
R	4,4

Se suministró menos aire que el teóricamente requerido.

5% del carbono del coque se perdió en las cenizas, y el 16% del carbono que reaccionó pasó a formar CO en lugar de CO_2.

El aire utilizado estaba húmedo, conteniendo 22 gramos de vapor de agua en cada metro cúbico de aire húmedo. Esta humedad combuste con el carbono, de acuerdo a la reacción siguiente:

$$C + H_2O = CO + H_2$$

El H_2 permanece sin oxidarse.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire húmedo utilizado, por kilogramo de coque.
2. El volumen de los gases productos de la combustión, por kilogramo de coque.
3. La intensidad calórica:
   a. Si el coque fuera quemado completamente con aire seco.
   b. Si el coque fuera quemado bajo las condiciones establecidas arriba.

SOLUCION

1.

Distribución del C:

C en cenizas = 0,858x0,05 = 0,0429 Kg.

C que reacciona = 0,858 – 0,0429 = 0,8151 Kg.

$C \rightarrow CO$ = 0,8151x0,16 = 0,1304 Kg.

$C \rightarrow CO_2$ = 0,8151 – 0,1304 = 0,6847 Kg.

Reacciones:

1): $C + O_2 = CO_2$

2): $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$

3): $C + H_2O = CO + H_2$

Cálculo del aire húmedo y seco:

H_2O en 1 m^3 de aire húmedo = 22 g·(1 Kg/1000 g) · (22,4 m^3/18 Kg.) = 0,027 m^3

Aire seco en 1 m^3 de aire húmedo = 1 – 0,027 = 0,973 m^3

Composición del aire húmedo = 2,7%H_2O y 97,3% de aire seco.

O_2 en 1 m^3 de aire húmedo = 0,973x0,21 = 0,2043 m^3

C para H_2O en 1 m^3 de aire húmedo (reacción 3) = 0,027·(12/22,4) = 0,014 Kg.

El C que pasa a CO, no todo reacciona con el H_2O, por tanto, tendremos que distribuirlo para calcular la proporción de O_2 que va a CO y a CO_2.

O_2 en CO = 0,1304·(16/12) · (22,4/32) = 0,1217 m^3 = 8,69%

O_2 en CO_2 = 0,6847·(32/12) · (22,4/32) = 1,2781 m^3 = 91,31%

1,3998 m^3

O_2 en H_2O = 0,027/2 = 0,0135 m^3

O_2 total en 1 m^3 de aire húmedo = 0,2043 + 0,0135 = 0,2178 m^3

$O_2 \rightarrow CO_2$ = 0,2178x0,9131 = 0,1989 m^3

$O_2 \rightarrow CO$ = 0,2178x0,0869 = 0,0189 m^3

O_2 en CO (aire) = 0,0189 – 0,0135 = 0,0054 m^3

Distribución del C:

C para CO_2 = 0,1989·(12/22,4) = 0,1065 Kg. = 84%

C para CO = 0,0054·(12/11,2) = 0,0058 Kg. = 4,6%

C para H_2O = 0,0270·(12/22,4) = 0,0145 Kg. = 11,4%

Σ = 0,1268 Kg.

Reacción (1): O_2 = 0,8151x0,840x(22,4/12) = 1,2781 m^3

Reacción (2): O_2 = 0,8151x0,046x(11,2/12) = 0,0350 m^3

O_2 del aire = 1,3131 m^3

Aire seco = 1,3131/0,21 = 6,253 m^3

Aire húmedo = 6,253/0,973 = 6,426 m^3

Aire húmedo = 6,426 m^3 (53-1)

2.

Productos de combustión = $H_2 + CO + CO_2 + N_2 + H_2O$:

H_2 = 0,8151x0,114x(22,4/12) = 0,1734 m^3

CO_2 = 1,2781 m^3

CO = 0,035x2 + 0,8151x0,114x(22,4/12) = 0,2435 m^3

N_2 = 6,253x0,79 = 4,9499 m^3

H_2O = 0,044x(22,4/18) + 6,426 – 6,253 – 0,1734 = 0,0544 m^3

P.C = 0,1734 + 1,2781 + 0,2435 + 4,9499 + 0,0544 = 6,6993 m^3

Productos de combustión = 6,7 m^3 (53-2)

3.

a.

Sabemos que:

Potencia calorífica + calor por precalentamiento del combustible(=0) + calor por precalentamiento del aire(=0) = Volumen P.C x calor específico x temperatura ∴

Temperatura = calorías disponibles/(volumen P.C x calor específico).

P.C.B = 8100x0,8151 – 586x0,044 = 6577 Kcal/Kg.

En este caso las reacciones de combustión es la (1), por tanto:

O_2 del C = 0,8151·(22,4/12) = 1,5215 m^3 = CO_2

H_2O = 0,044·(22,4/18) = 0,0548 m^3

Aire = 1,5215/0,21 = 7,2453 m^3

N_2 = 7,2453x0,79 = 5,7238 m^3

Contenido de calor en los productos de combustión a cualquier temperatura:

N_2 = 5,7238·(0,302 + 2,2x10^{-5} t) · t =

CO_2 = 1,5215·(0,406 + 9,0x10^{-5} t) · t =

H_2O = 0,0548·(0,373 + 5,0x10^{-5} t) · t = ______________

Σ = 2,367 t + 2,656x10^{-4} t^2

6577 = 2,367 t + 2,656x10^{-4} t^2 ∴

t = 2223,7ºC

Intensidad calórica = 2224ºC (53-3.a)

b.

Potencia calorífica de C:

C → CO = 2430 Kcal/Kg.

C→ CO_2 = 8100 "

Potencia calorífica = 0,6847x8100 + 0,1304x2430 – 586x0,044 = 5838 Kcal/Kg.

Contenido de calor en productos de combustión:

CO + N_2 + H_2 = 5,3668·(0,302 + 2,2x10^{-5} t) · t =

CO_2 = 1,2781·(0,406 + 9,0x10^{-5} t) · t =

H_2O = 0,0544·(0,373 + 5,0x10^{-5} t) · t = ______________

Σ = 2,160 t + 2,358x10^{-4} t^2

5838 = 2,160 t + 2,358 t^2 ∴

t = 2183ºC

Intensidad calórica = 2183ºC (53-3.b)

En el caso anterior no se tomó en cuenta la descomposición del agua para formar CO y H_2, pero incorporando este fenómeno, tendríamos:

La reacción de descomposición del agua es la (3).

Los calores de formación del $H_2O(g)$ y del CO, son respectivamente: - 57801 y – 29160 Kcal/mol. (ver Tabla XLII del Apéndice):

H_2O = 0,8151x0,114·(18/12) = 0,1394 Kg. = 0,0077 moles.

CO = 0,8151x0,114·(28/12) = 0,2168 Kg. = 0,0077 moles.

Calor de reacción = 0,0077x(-29160 + 57801) = +222 Kcal.

Potencia calorífica = 0,6848x8100 + 0,8151x0,046x2430 – 586x0,044 = 5612 Kg.

A esta hay que restarle en calor de reacción que por tener signo (+), fue calor consumido.

Calor disponible = 5612 – 222 = 5390 Kcal.

5390 = 2,160 t + 2,358 t^2 ∴

t = 2041ºC

Intensidad calórica = 2041ºC (53-3.b)

EJERCICIO Nº54 (9)

Los datos siguientes se obtuvieron de un carbón bituminoso.

Análisis final, base en seco:

C	77,6%	O	4,5%
H	5,3	N	1,5
S	2,8	Cenizas	8,3

En húmedo, el carbón tenía una humedad del 4%.
Potencia calorífica bruta (P.C.A), en seco, BTU/lb = 13800.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica en húmedo.
2. La potencia calorífica neta (P.C.B), en seco.
3. La potencia calorífica neta, en húmedo.
4. La potencia calorífica bruta, en seco, utilizando la fórmula de Dulong (compararla con el valor medido).

SOLUCION

1.

En base húmeda, la composición del carbón presentada inicialmente representaría el 96% del peso, por tanto, la composición en húmedo sería:

C = 0,776x96 = 74,50%
H = 0,053x96 = 5,09
N = 0,015x96 = 1,44
O = 0,045x96 = 4,31
S = 0,028x96 = 2,69
Cenizas = 0,083x96 = 7,97
H_2O = 4,00
100,00

Fórmula de Dulong:
P.C.A = 14600C + 61000·(H – O/8) + 4000S
P.C.A = 14600x0,745 + 61000·(0,0509 – 0,0431/8) + 4000x0,0269 = 13761
P.C.A(en húmedo) = 13761 BTU/lb (54-1)

2.

P.C.B = 14600C + 61000·(H – O/8) + 4000S – 1050·(9H + W)
P.C.B = 14600x0,776 + 61000·(0,053 – 0,045/8) + 4000x0,028 – 1050·(9x0,053 + 0) =
= 13830
P.C.B (en seco) = 13830 BTU/lb (54-2)

3.

P.C.B (en húmedo) = P.C.A – 1050·(9H + W)
P.C.B (en húmedo) = 13761 – 1050·(9x0,0509 + 0,04) = 13238
P.C.B (en húmedo) 13238 BTU/lb (54-3)

4.

P.C.A (en seco) = 14600x0,776 + 61000·(0,053 – 0,045/8) + 4000x0,028 = 14331
P.C.A (en seco) = 14331 BTU/lb (54-4)

Este valor resultó mayor que el medido.

EJERCICIO N°55 (8)

360 kilogramos de vapor de agua pasan a través de 4000 kilogramos de coque a una temperatura inicial de 1400°C formándose 448 Kilogramos de CO, 88 de CO_2 y 40 de H_2; a una temperatura media de 1000°C.

El vapor entra a 120°C, saturado.

La pérdida por radiación es de 100000 kilocalorías.

PREGUNTAS

1. Calcular la temperatura final del lecho de coque.

SOLUCION

1.

Para la solución de este ejercicio vamos a necesitar los datos que se dan a continuación y que se encuentran en la Tabla 19 (8):

Capacidad calorífica media (C_P) = Kcal/mol

$C_p(H_2O)$:

8,084 (25°C – 100°C)

8,177 (200°C)

por interpolación se encuentra para 120°C = 8,1026

$C_p(CO)$ = 7,587 (1000°C)

$C_p(CO_2)$ = 11,92 (1000°C)

$C_p(H_2)$ = 7,128 (1000°C)

C_p(coque) = 0,403 (25 – 1300°C)

Calor de vaporización del agua = 9717 Kcal/mol

Calores de formación (Kcal/mol)x1000 para:

$H_2O(l)$ = -68,3174

$H_2O(g)$ = -57,7979

C(amorfo) = +2,6

CO = - 26,4157

CO_2 = - 94,0518

Cálculo de los moles de los compuestos:

H_2O = 360/18 = 20 Kg-mol

Coque = 4000/12 = 333,33 Kg-mol

CO = 448/28 = 16

CO_2 = 88/44 = 2

H_2 = 40/2 = 20

Reacción:

$$20H_2O + 18C = 16CO + 2CO_2 + 20H_2$$

Lecho de coque al final = 333,33 – 18 = 315,33 Kg-mol

Ya sabemos que:

Contenido de calor = Cantidad x Capacidad calorífica x temperatura:

Calor de entrada:

Coque = 4000x0,403x(1400 – 25) = 2'216.500 Kcal.

H_2O = 20x8,084x(100 – 25) + 29x8,1026x(120 –100) = 209.707 Kcal

Calor de entrada = 2'216.500 + 209.707 = 2'426.207 Kcal.

Se sabe que:

Calor de reacción = ∑calor de formación de productos - ∑calor de formación reactivos.

Calor de reacción = [2x(- 94052) + 16x(-26416)] – [18x(+2600) + 20x(-57798)] =

= + 498.400 Kcal

Contenido de calor en los gases a 1000°C:

CO = 16x7,587x(1000 - 25) = 118357 Kcal

CO_2 = 2x11,92x(1000 – 25) = 23244 kcal

H_2 = 20x7,128x(1000-25) = <u>138996 Kcal</u>

∑ = 280597 Kcal.

Calor final en el lecho de coque (Q) = Calor de entrada – calor consumido en la reacción – calor que se llevan los gases – pérdidas por radiación

Q = 2'426.207 – 498.400 – 280.597 – 100.000 = 1'547.210 Kcal.

Suponiendo que el coque es C puro:

Lecho de coque = 315,33 Kg-mol · (12 Kg/1 Kg-mol) = 3783,96 Kg.

1'547.210 = 3783,96x0,403x(t – 25) ∴

t = 1039,6°C

Temperatura final del lecho de coque = 1040°C (55-1)

EJERCICIO N°56 (8)

PREGUNTAS

1. Calcular la temperatura máxima teórica de la llama, en °C, cuando se quema en siguiente gas con la cantidad teórica de aire seco; partiendo de aire y gas a 25°C.

CO	30%
H_2	15
O_2	1
CO_2	5
N_2	49

SOLUCION

1.

En los ejercicios anteriores, para el cálculo de calor se ha utilizado el calor específico cuyas unidades son Kcal o BTU por Kg. y/o por libra y por temperatura en °C. En este caso, utilizaremos la capacidad calorífica cuyas unidades son, unidades de calor (Kcal o BTU), por mol y por temperatura pero absoluta (K, o R). Por eso, nuestro balance lo haremos sobre la base del mol.

Reacciones de combustión:

$$CO + \tfrac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$$
$$H_2 + \tfrac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$$

Supongamos 1 mol de CO:

Balance del gas inicial:

CO	1,000 mol-g
$H_2 = 1\cdot(15/30) =$	0,500 mol-g
$O_2 = 1\cdot(1/30) =$	0,033 mol-g
$CO_2 = 1\cdot(5/30) =$	0,167 mol-g
$N_2 = 1\cdot(49/30) =$	1,630 mol-g

Cálculo del aire:

O_2 del CO = 0,5 mol-g

O_2 del H_2 = 0,5·(1/2) = 0,25 mol-g

O_2 del aire teórico = 0,5 + 0,25 – 0,033 = 0,717 mol-g

Aire teórico = 0,717/0,21 = 3,414 mol-g.

Productos de combustión = $CO_2 + H_2O + N_2$

CO_2 = 0,167 + 1 = 1,167 mol-g

H_2O = 0,5 mol-g

N_2 = 1,63 + 3,414x0,79 = 4,327 mol-g.

La entalpía o calor de n moles de cualquier material producto a una temperatura T (K), referida a una temperatura de 25°C (298K), se expresa por

$$\sum H_p = \sum n_i \int_{298}^{T} C_{pi} dT \qquad (7)$$

Aquí, C_{pi} = capacidad calorífica del componente "i".

Esta capacidad calorífica normalmente se expresa como una función cuadrática de la temperatura,

$$C_{pi} = a_i + b_i T + c_i T^2 \qquad (8)$$

Introduciendo (8) en (7), e integrando:

$$\sum H_p = \sum n_i\left[a_i(T-298)+\frac{b_i}{2}\left(T^2-298^2\right)+\frac{c_i}{3}\left(T^3-298^3\right)\right] \qquad (9)$$

Entalpía de productos de combustión, $\sum H_p$ (referidas a 25°C = 298K):

CO_2: a = 6,339; b = 0,01014; c = - 3,415x10^{-6}
H = 1,167[6,339(T – 298) + (0,01014/2)·(T^2 – 298^2) - (3,415x10^{-6}/3)·(T^3 – 298^3)]
N_2: a = 6,457; b = 0,001388; c = - 0,069x10^{-6}
H = 4,327[6,457(T – 298) + (0,001389/2)·(T^2 – 298^2) – (0,069x10^{-6}/3)·(T^3 – 298^3)]
H_2O: a = 7,136; b = 0,00264; c = + 0,0459x10^{-6}
H = 0,5[7,136(T – 298) + (0,00264/2)·(T^2 – 298^2) + (0,0459x10^{-6}/3)·(T^3 – 298^3)]

Sumando todo tendremos:

$\sum H_p$ = 38,905T + 0,00958T^2 – 1,42x$10^{-6}T^3$ – 12407

Los calores de combustión, potencias caloríficas, se encuentran tabulados (8):

H_2 = 68317,4 cal/mol-g
CO = 67636,1 cal/mol-g
Calor de combustión total = 67636 + 68317x0,5 = 101794,5 cal.

Este es el calor disponible ∴

38,905T + 0,0095T^2 – 1,42x$10^{-6}T^3$ – 12407 = 101795,5

Por prueba y error se determinó T:

T = 2160K = 1887°C

Temperatura teórica de la llama = 1887°C. (56-1)

EJERCICIO N°57 (8)

PREGUNTAS

1. Calcúlese la temperatura teórica de la llama cuando el gas anterior se quema con un 100% de aire exceso.

SOLUCION

1.

En este caso, la composición y la cantidad de los productos de combustión cambia, pues habrá que adicionarles el oxígeno y el nitrógeno del aire en exceso.

Aire exceso = 3,414 mol-g
N_2,esceso = 3,414x0,79 = 2,697 mol-g
O_2,exceso = 3,414 – 2,697 = 0,717 mol-g.

Entalpía de estos productos de combustión:

N_2:
H = 2,697[6,457(T – 298) + (0,001389/2)·(T^2 – 298^2) – (0,069x10^{-6}/3)·(T^3 – 298^3)]

O_2:
H = 0,717[6,177(T-298) + (0,003167/2)·(T^2 – 298^2) – (1,005x10^{-6}/3)·(T^3 – 298^3)]

La sumatoria de estos:

H (N_2 + O_2) = 21,80T + 3.01x$10^{-3}T^2$ – 3,02x$10^{-7}T^3$ – 6756

Si le adicionamos este valor al de los P.C ya encontrados en el ejercicio anterior, tomando en cuenta que la potencia calorífica del gas sigue siendo la misma, nos resulta:

60,705T + 12,59x$10^{-3}T^2$ – 1,722T^3 = 120957,5

Por prueba y error se determino T:

$T = 1580K = 1307°C.$

Se puede observar que el valor de T disminuyó, debido a que el aire exceso también absorbe calor.

Temperatura teórica de la llama = 1307°C (57-1)

EJERCICIO N°58 (8)

PREGUNTAS

1. Calcular la temperatura de la llama para el gas del ejercicio 56 cuando se quema con la cantidad de aire teórica y ambos, gas y aire, se calientan a 500°C previamente a la combustión.

SOLUCION

1.

Capacidad calorífica media entre 25 y t°C (cal/mol-g.K), ver tablas pag. 269 (8):

$T = 500°C$:
O = 7,210
$H_2 = 6,995$
$O_2 = 7,515$
$CO_2 = 10,776$
$N_2 = 7,159$
Aire = 7,225

Aire teórico = 3,414 mol-g
O_2 total = 0,033 + 0,717 = 0,75 mol-g
N_2 total = 1,63 + (3,414 – 0,717) = 4,327 mol-g

Precalentamientos del gas + aire:

CO = 1x7,210 (500 – 25) =	3424,75 cal
H_2 = 0,5x6,995 (500 – 25) =	1661.31
O_2 = 0,75x7,515 (500 – 25) =	1677,22
CO_2 = 0,167x10,776 (500 – 25)	854,81
N_2 = 4,327x7,159 (500 – 25)	14714,07 cal
Total precalentamiento	23332,16 cal

Este calor se le adiciona a la potencia calorífica para formar en calor total disponible, así:

$$38{,}905T + 9{,}58x10^{-3}T^2 - 1{,}42x10^{-6}T^3 - 12407 = 101794{,}5 + 23332{,}2$$
$$38{,}905T + 9{,}58x10^{-3}T^2 - 1{,}42x10^{-6}T^3 = 137534$$

Por prueba y error, T resultó:

$T = 2550K = 2277°C$

Se puede observar que al precalentar el aire y el gas, la temperatura de la llama aumentó.

Temperatura de la llama = 2277°C (58-1)

EJERCICIO N°59 (8)

PREGUNTAS

1. Calcular la temperatura teórica de la llama para el gas del ejercicio 56, si es quemado con la cantidad teórica de aire; pero la combustión del CO y el H_2 se realiza solo en un 80%. El gas y el aire se encuentran inicialmente a 25°C.

SOLUCION

1.
Potencia calorífica = 101794,5x0,8 = 81435,6 cal
El 20% del CO y del H_2 va a los P.C:

Cálculo de los productos de combustión:

$CO = 1x0,2 = 0,2$ mol-g
$H_2 = 0,5x0,2 = 0,1$ mol-g
$CO_2 = 0,167 + 0,8 = 0,967$ mol-g
O_2 del CO = 0,8·(1/2) = 0,4 mol-g
O_2 del H_2 = 0,5x0,8x0,5 = 0,2 mol-g
O_2 reacción = 0,6 mol-g
O_2 del aire teórico = 0,6 – 0,033 = 0,567 mol-g
Aire teórico = 0,567/0,21 = 2,7 mol-g
N_2 total = 1,63 + 2,7 – 0,567 = 3,763 mol-g
H_2O = 0,5x0,8 = 0,4 mol-g

Contenido de calor en los P.C:

$CO = 0,2[6,350\cdot(T-298) + (1,811x10^{-3}/2)\cdot(T^2-298^2) - (0,2675x10^{-6}/3)\cdot(T^3-298^3)]$
$H_2 = 0,1[6,946\cdot(T-298) - (0,196x10^{-3}/2)\cdot(T^2-298^2) + (0,4757x10^{-6}/3)\cdot(T^3-298^3)]$
$CO_2 = 0,967[6,339\cdot(T-298) + (10,14x10^{-3}/2)\cdot(T^2-298^2) - (3,415x10^{-6}/3)\cdot(T^3-298^3)]$
$N_2 = 3,763[6,457\cdot(T-298) + (1,389x10^{-3}/2)\cdot(T^2-298^2) - (0,069x10^{-6}/3)\cdot(T^3-298^3)]$
$H_2O = 0,4[7,136\cdot(T-298) + (2,64x10^{-3}/2)\cdot(T^2-298^2) + (0,0459x10^{-6}/3)\cdot(T^3-298^3)]$
$\Sigma = 35,247T + 8,215x10^{-3}T^2 - 1,183x10^{-6}T^3 - 11202$

Calor disponible = contenido de calor en los P.C
$81435,6 = \Sigma$
Resolviendo por prueba y error, se encontró T = 1973K = 1700°C

Temperatura teórica de la llama = 1700°C (59-1)

EJERCICIO N°60 (8)

Un gas combustible tiene la siguiente composición en volumen:

CO_2	2,1%
O_2	0,5
$C_{2,5}H_{4,2}$(olefinas)	7,0
CO	38,8
H_2	40,6
$C_{1,2}H_{4,4}$(parafinas)	11,2
N_2	4,8

PREGUNTAS

1. Calcúlese el análisis de los humos formados por combustión de este gas con un 30% de aire en exceso, supuesto que todos los componentes combustibles se quemen a CO_2 y H_2O.
2. Calcular la potencia calorífica en BTU/ft^3 normal.

SOLUCION

1.

Vamos a calcular el oxígeno consumido y los productos de combustión (humos) resultantes de quemar 1 m^3 de gas, como lo muestra el cuadro siguiente:

Reacciones	O_2 + humos (m^3/m^3 de gas)			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2
$C_{2,5}H_{4,2} + 3,55O_2 = 2,5CO_2 + 2,1H_2O$	0,2485	0,1750	0,1470	---
$CO + ½\ O_2 = CO_2$	0,1940	0,3880	---	---
$H_2 + ½\ O_2 = H_2O$	0,2030	---	0,4060	---
$C_{1,2}H_{4,4} + 2,3O_2 = 1,2CO_2 + 2,2H_2O$	0,2576	0,1344	0,2464	---
N_2	---	---	---	0,048
CO_2	---	0,0210	---	---
Totales	0,9031	0,7184	0,7994	0,048

O_2 para el aire teórico = 0,9031 – 0,005 = 0,8981 m^3
Aire teórico = 0,8981/0,21 = 4,2767 m^3
Aire total = 4,2767x1,3 = 5,56 m^3
Aire exceso = 5,56 – 4,2767 = 1,283 m^3

Análisis de los humos (60-1)

O_2 = 1,283x0,21 = 0,2694 m^3 = 4,33%
N_2 = 5,56x0,69 + 0,048 = 4,4404 m^3 = 71,30%
CO_2 = 0,7184 m^3 = 11,54%
H_2O = 0,7994 m^3 = 12,83%
6,2276 m^3 =100,00

2.

Los datos para el cálculo de la potencia calorífica de este tipo de combustibles gaseosos, aparecen en la Tabla 37, página 427 de (8).

Para el caso de las potencias caloríficas de los hidrocarburos saturados y no saturados, la potencia calorífica se calcula por medio de las fórmulas aproximadas siguientes:

Hidrocarburos parafínicos (saturados), C_nH_{2n+2} (n = # átomos de C):

$$Cal \text{ por mol - g} = 158100\,n + 54700$$

$$\mathrm{BTU}/\mathrm{ft}^3 = 745n + 258 \qquad (10)$$

Para hidrocarburos no saturados, C_aH_b:

$$Cal \text{ por mol - g} = 98200a + 28200b + 28800$$

$$BTU/ft^3 = 459a + 132b + 135 \qquad (11)$$

Potencia calorífica de:

$C_{2,5}H_{4,2}$ = 0,07·(459x2,5 + 132x4,2 + 135) = 128,6 BTU
CO = 0,388x316 = 122,6 BTU
H_2 = 0,406x319 = 129,5 BTU
$C_{1,2}H_{4,4}$ = 0,112·(745x1,2 + 258 = 129,0 BTU
509,7 BTU

Potencia calorífica = 510 BTU (60-2)

EJERCICIO N°61 (8)

Un gas pobre tiene la siguiente composición en volumen:

CO	23,0%
CO_2	4,4
O_2	2,4
N_2	70,0

PREGUNTAS

1. Calcular los pies cúbicos de gas, a 70°F y 750 mm Hg de presión, por libra de carbono presente.

2. Calcúlese el volumen de aire, en las condiciones de la pregunta 1, necesario para la combustión de 100 pies cúbicos de gas a las mismas condiciones; si se desea que el oxígeno total presente antes de la combustión sea del 20% en exceso del necesario teóricamente.

3. Calcúlese la composición, en porcentaje en volumen, de los gases que salen del quemador de la pregunta 2; supuesta completa la combustión.

4. Calcúlese el volumen de los gases que salen de la combustión en las preguntas 2 y 3, a la temperatura de 600°F y presión de 750 mm Hg; por cada 100 pies cúbicos de gas quemado.

SOLUCION

1.

Haremos el cálculo a C.N y luego pasaremos a las condiciones reales.
Usando la ecuación (6):

C total en gases = 1 lb.

Asumimos 1 ft^3 de gas

C/ft^3 de gas = C en CO + C en CO_2
C/ft^3 de gas = 0,23·(12/359) + 0,044·(12/359) = 0,00916 lb/ft^3
ft^3 de gas a C.N = 1/0,00916 = 109,185

Pasamos a C.D:

$V_1 = 109{,}185\ ft^3$	$V_2 = ?$
$P_1 = 760$ mm	$P_2 = 750$ mm
$T_1 = 492°R$	$T_2 = 460 + 70 = 530°R$

$V_2 = 109{,}185 \cdot (760/750) \cdot (530/492) = 119{,}18\ ft^3$

Gas a C.D = 119,2 ft^3 (61-3)

2.

Reacción de combustión:

$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$
O_2 del CO = 100x0,23x0,5 = 11,5 ft^3
O_2 para el aire teórico = 11,5 – 100x0,024 = 9,1 ft^3
O_2 total = 9,1x1,2 = 10,92 ft^3
Aire = 10,92/0,21 = 52 ft^3

Aire total = 52 ft^3 (61-2)

3.
P.C = $CO_2 + O_2 + N_2$

Composición del gas (61-3)

$CO_2 = 100x0,044 + 23 \quad = 27,40\ ft^3 = 19,53\%$
$O_2 = 10,91 - 9,1 \quad = \ 1,82\ ft^3 = \ 1,30\%$
$N_2 = 100x0,7 + 52x0,79 = \underline{111,08\ ft^3} = \underline{79,17\%}$
$140,30\ ft^3 \quad 100,00\%$

4.

$V_1 = 140,3\ ft^3$ $\quad V_2 = ?$
$P_1 = 750$ mm $\quad P_2 = 750$ mm
$T_1 = 530°R$ $\quad T_2 = 460 + 600 = 1060°R$

$V_2 = 140,3\cdot(1060/530) = 280,6\ ft^3$

Volumen de P.C a C.D = 280,6 ft^3 (61-4)

EJERCICIO N°62 (8)

Un gas tiene la siguiente composición en volumen:

No saturados (C_2H_4 y C_6H_6)	53,6%
O_2	1,6
CH_4	16,9
C_2H_6	24,3
N_2	3,6

La potencia calorífica de este gas es 1898 BTU/ft^3 normal.

PREGUNTAS

1. Calcular los porcentajes de C_2H_4 y C_6H_6 en el gas.

SOLUCION

1.
En (8), pag. 427, Tabla 37 se dan las potencias caloríficas de los gases (BTU/ft^3), en los términos que aparecen a continuación:

CH_4	994	C_2H_6	1742
C_2H_4	1756	C_6H_6	3687

P.C.B = P.C(CH_4) + P.C(C_2H_6) + P.C(C_2H_4) + P.C(C_6H_6)
Potencias caloríficas de:

$CH_4 = 994x0,169 \quad = 168,0$ BTU
$C_2H_6 = 1742x0,243 = \underline{423,3\ \text{BTU}}$
$591,3$ BTU

Sea:
A = fracción de C_2H_4
B = fracción de C_6H_6

Establezcamos el siguiente sistema de ecuaciones:

(1) $Ax1576 + Bx3687 = 1898 - 591,3 = 1306,7$
(2) $A + B = 0,536$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior:
A = 0,3172; B = 0,2188, por tanto:

C_2H_4 = **31,72%** y C_6H_6 = **21,88%** (62-1)

EJERCICIO N°63 (8)

Abajo se presentan los análisis para un carbón tipo antracita.

Ambos análisis, el mediato y el próximo, están realizados sobre la base "como se reciben"; y el hidrógeno dado en el análisis mediato incluye el hidrógeno de la humedad libre en el carbón.

ANALISIS PROXIMO		ANALISIS MEDIATO	
Humedad	4,3%	Carbono	82,5%
Materia volátil	3,0%	Hidrógeno	2,0%
C (fijo)	82,6%	Nitrógeno	0,6%
Cenizas (no corregidas)	10,1%	Azufre	0,5%

Potencia calorífica = 12650 BTU/lb.

PREGUNTAS

1. Recalcular el análisis mediato, aportando:
   (a) Carbono
   (b) Hidrógeno neto
   (c) H_2O libre
   (d) H_2O combinada
   (e) Azufre
   (f) Nitrógeno
   (g) Cenizas corregidas

2. Calcular la potencia calorífica total por la fórmula de Dulong. Comparar el resultado con el valor experimental.

3. Calcular la potencia calorífica total por el método de Uehling. Comparar el resultado con el valor experimental.

4. Suponiendo que solo se dispone del análisis próximo y de la potencia calorífica total, calcular el porcentaje de carbono y el porcentaje de hidrógeno neto por el método de Uehling.

5. Calcular la potencia calorífica neta.

SOLUCION

1.

En un *análisis mediato* se hace la determinación de c/u de los principales elementos químicos.

En un *análisis próximo o inmediato* se determinan cuatro grupos de constituyentes definidos arbitrariamente: *humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas.*

Para el cálculo de este punto, haremos uso de la siguiente expresión:

$$\text{\% de cenizas corregidas} = \text{\% cenizas pesadas} - \frac{3}{8}(\%S) \qquad (12)$$

% cenizas corregidas = 10,1 – (3/8)x0,5 = 9,9125%

El exceso de hidrógeno necesario para combinarse con el oxígeno, se denomina hidrógeno "neto" o "aprovechable".

El porcentaje de oxígeno que contiene el carbón, se toma como la diferencia entre 100 y la suma de los porcentajes de C, H, S, N y las cenizas corregidas exentas de S.

O_2 del agua combinada = 100 – 85,6 – 4,3 – 9,91 = 0,19%

H_2O combinada = 0,19·(18/16) = 0,21%

H_2 de esta = 0,21 – 0,19 = 0,02%

H neto = 2 – 0,02 = 1,98%

Análisis Mediato Recalculado (63-1)

C	82,50%
H neto	1,98
H_2O libre	4,30
H_2O combinada	0,21
S	0,50
N	0,60
Cenizas corregidas	9,91
	100,00

2.

Vamos a replantear el cálculo de la potencia calorífica sobre la base de las siguientes fórmulas:

$$Potencia\ \text{calorifica total} = 14490C + 61000H_{neto} + 5550S \quad (13)$$

$$\text{Potencia calorífica neta} = \text{P.C total} - 8{,}94xHx1050 \quad (14)$$

P.C total = 14490x0,825 + 61000x0,0198 + 5550x0,005 = 13190 BTU/lb.

Potencia calorífica total = 13190 BTU/lb (63-2)

Con relación al dato experimental existe una diferencia de 13190 – 12650 = 540 BTU/lb, lo que significa un error de 540/12650 = 4,27%. Esto puede deberse a que los elementos combustible que se asumen libres, pueden estar combinados formando cenizas de diversa naturaleza, o gases que no se descompusieron para reaccionar.

3.

Uehling utilizó diversos criterios para establecer la siguiente tabla (8):

POTENCIAS CALORIFICAS NORMALES Y CONTENIDOS EN HIDROGENO NETO DE CARBON:

CALIDAD	P.C (BTU/lb)	H_n (hidrógeno neto)
Coque	14490	0,0
Antracita	16100	0,029
Semi-bituminoso	17400	0,049
Bituminoso	17900	0,054
Sub-bituminoso	17600	0,045
Lignito	17100	0,037

Para el carbón antracítico:

P.C total = 16100 BTU/lb de C total

P.C total = 16100x0,825 = 13282,5 BTU/lb.

P.C total = 13282,5 BTU/lb (63-3)

En este caso, la diferencia es de 13282 – 12650 = 632 BTU/lb, representando un error de 632/12650 = 5% que como se puede ver, es mayor que en la fórmula de Dulong; lo cual se puede deber a que esta última se fundamenta en el análisis elemental y la de Uehling solo toma en cuenta el hidrógeno y el C independientemente de cualquier cantidad que al no reaccionar, se vaya a las cenizas.

4.

Como solo disponemos de la potencia calorífica total y del análisis próximo, de acuerdo a Uehling podemos proceder así:

12650 = 16100C ∴

C = 12650/16100 = 0,7857

C = 78,57% (63-4)

Para esta calidad de carbón:

H neto = 0,029 lb/lb de C total ∴

H neto = 0,7857x0,029x100 = 2,28

H neto = 2,28% (63-4)

5.

Haciendo uso de la fórmula (14):

H = fracción en peso del H (total), incluyendo H (neto), H (humedad) y H (H_2O combinada).

H (total) = 1,98 + 4,3x(2/18) + 0,02 = 2,48%

P.C neta = 13190 – 8,94x0,0248x1050 = 12957

P.C neta = 12957 BTU/lb. (63-5)

EJERCICIO N°64 (8)

Un carbón americano presentó el siguiente análisis:

ANALISIS PROXIMO AL RECIBIRLO		ANALISIS MEDIATO DE COMBUSTIBLE (sobre la base de exento de cenizas corregidas y de humedad)	
Humedad	2,97%	C	84,39%
Cenizas (no corregidas)	2,94	Hidrógeno neto	4,81
Materia volátil	37,75	N	2,00
Carbono (fijo)	56,34	S	1.02
		H_2O (combinada)	7,78

El combustible anterior incluye aquellas porciones del carbón que no están clasificadas como humedad o cenizas corregidas.

PREGUNTAS

Determinar sobre la base "del recibido":

1. Calidad del carbón.
2. Potencia calorífica total por la fórmula de Dulong.
3. Potencia calorífica total por el método de Uehling.
4. Contenido de hidrógeno neto, calculado por el método de Uehling.
5. Potencia calorífica neta por el método de Uehling.
6. Análisis mediato (como se recibe, cenizas corregidas).

SOLUCION

1.

La *proporción combustible* de un carbón se define (8) como la relación entre el porcentaje de carbono fijo y el de materia volátil. En base a esta definición se ha elaborado la siguiente

CALIDAD DE CARBONES

CALIDAD	PROPORCION COMBUSTIBLE
Antracita	Entre 10 y 60
Semiantracita	Entre 6 y 10
Semibituminoso	Entre 3 y 7
Bituminoso	Entre ½ y 3

$$\text{Proporción Combustible} = \frac{\%C\,(\text{fijo})}{\%\ \text{Materia Volátil}} \qquad (15)$$

Para este carbón = 56,34/37,75 = 1,49.

Esta proporción combustible ubica a este carbón en el rango bituminoso.

Calidad del carbón = Bituminoso (64-1)

2.

La ecuación 13, de Dulong se expresa:

$$\text{P.C. Total} = 14490C + 61000H_{neto} + 5550S.$$

Como puede verse, esta fórmula tiene aplicación para el análisis mediato (elemental) pero no para el próximo (inmediato), por tanto, debemos ajustar el análisis elemental mediante la inclusión de la humedad y las cenizas corregidas.

Si asumimos 100 libras de carbón (recibido):

Humedad = 2,97 lbs.

La ecuación 12:

% cenizas corregidas = % cenizas total – (3/8) · %S

% cenizas corregidas = 2,84 – 1,02·(3/8) = 2,56%

Análisis mediato sin cenizas ni humedad = 100 – 2,97 – 2,56 = 94,97%

El análisis mediato quedaría:

C = 84,39x0,9447 =	79,72%
H_{neto} = 4,81x0,9447 =	4,54%
N = 2x0,9447 =	1,89%
S = 1,02x0,9447 =	0,96%
H_2O (combinada) = 7,78x0,9447 =	7,35%
Humedad =	2,97%
Cenizas corregidas =	2,96%
	99,99%

Sobre la base de este análisis podemos utilizar la ecuación 13:

P.C total = 14490x0,7972 + 61000x0,0454 + 5550x0,0096 = 14374

P.C total = 14374 BTU/lb. (64-2)

3.

Para el método de Uehling utilizamos la tabla que aparece en el punto 3 del ejercicio 63, la cual nos relaciona la potencia calorífica por libra de C total para una determinada calidad de carbón:

Para el carbón bituminosos este valor es = 17900 BTU/lb. de C total.

P.C total = 17900x0,7992 = 14269

P.C total (Uehling) = 14269 BTU/lb de C total (64-3)

4.

La tabla de Uehling presenta para el carbón bituminoso, H_n = 0,054 lb/lb de C total.

H_{neto}= 0,7972x0,054 = 0,043

H_{neto}= 4,30% (64-4)

5.

La ecuación 14 nos permite el cálculo de la potencia calorífica neta por el método de Uehling:

P.C. neta = P.C total – 8,94xHx1050.

H = fracción en peso del H total, incluyendo el H neto, H de la humedad y el H de agua combinada.

H = 4,30 + 2,97·(2/18) + 7,35·(2/18) = 5,45%

P.C. neta = 14270 – 8,94x0,0545x1050 = 13758,4

P.C. neta = 13758 BTU/lb (64-5)

6.

El análisis mediato ya fue calculado en el punto 2.

Análisis mediato (64-6)

Humedad =	2,97%
H_2O (combinada) =	7,35%
Cenizas (corregidas) =	2,56%
C =	79,72%
H_{neto} =	4,54%
N =	1,89%
S =	0,96%
	99,99%

EJERCICIO N°65 (8)

En la fabricación del ácido sulfúrico por el método de contacto, se queman piritas de hierro, FeS_2, en aire seco, siendo oxidado el hierro a Fe_2O_3.

El SO_2 que se forma se oxida posteriormente a SO_3 pasando los gases mezclados con aire sobre una masa catalítica de negro de platino a temperatura conveniente.

Hay que suponer que en la operación se suministra aire suficiente para quemar las piritas, de forma que el oxígeno estará en un 40% de exceso del necesario para que todo el azufre que realmente se quema, fuese oxidado a trióxido.

De las piritas cargadas, se pierde el 15% por caerse de la parrilla con la escoria y no se quema.

PREGUNTAS

1. Calcúlese el peso de aire que ha de utilizarse por 100 libras de piritas cargadas.

2. En el quemador y en una columna de contacto conectada con él, el 40% del azufre quemado se convierte a SO_3. Calcúlese la composición en peso, de los gases que salen de la columna de contacto.

3. Por medio de la masa catalítica de platino, el 96% del SO_2 que aun queda en los gases que salen de la columna de contacto se convierten a SO_3. Calcúlese el peso total del trióxido de azufre formado por 100 libras de piritas cargadas.

4. Suponiendo que todos los gases que proceden de la columna de contacto pasan por el catalizador, calcúlese la composición en peso de los productos gaseosos que resultan.

5. Calcúlese el grado total de conversión a SO_3 en los productos finales del azufre de las piritas cargadas.

SOLUCION

1.

Reacciones:

1) $2FeS_2 + 5{,}5O_2 = Fe_2O_3 + 4SO_2$

2) $4SO_2 + 2\,O_2 = 4SO_3$

3) $2FeS_2 + 7{,}5O_2 = Fe_2O_3 + 4SO_3$

FeS_2 = 100 libras

Sobre la base de la ecuación 3:

$O_2 = 100\,(7{,}5/2)\cdot(32/120) = 100$ lbs.

Aire teórico a partir de este = 100/0,232 = 431,03 lbs.

Aire total = 431,03x1,4 = 603,45 lbs.

Dado que solo se pierde el 15% de pirita:
Aire real = 603,45x0,85 = 512,93 lbs.
Aire real = 512,93 lbs. (65-1)

2.
SO_2 total formado = 100x0,85x(4x64/2x120) = 90.67 Lbs.
$SO_2 + \frac{1}{2} O_2 = SO_3$
$SO_2 \rightarrow SO_3$ = 90,67x0,4 = 36,27 lbs.
$SO_2 \rightarrow$ gas = 90,67 – 36,27 = 54,40 lbs.
SO_3 = 36,27·(80/64) = 45,34 lbs.
O_2 que reacciona = 36,27·(2x32/4x64) = 9,07 lbs.
O_2 reacción 1 = 85·(5,5x32/2x120) = 62,34 lbs.
N_2 = 512,93x0,768 = 393,93 lbs.
$O_2 \rightarrow$ gas = 512,93 – 393,93 – 9,07 – 62,34 = 47,59 lbs.
Composición del gas en peso (65-2)

SO_2 =	54,40 lbs =	10,05%
SO_3 =	45,34 lbs =	8,38%
O_2 =	47,59 lbs =	8,79%
N_2 =	393,93 lbs =	72,78%
	541,26 lbs	100,00%

3.
SO_3 total = 54,40x0,96·(80/54) + 45,34 = 110,62 lbs
SO_3 total = 110,62 lbs (65-3)

4.
O_2 consumido en el catalizador = 54,40x0,96·(2x32/4x64) = 13,056 lbs
Composición del gas en peso (65-4)

SO_2 = 54,40x0,04 =	2,18 lbs =	0,40%
SO_3 =	110,62 lbs =	20,44%
O_2 = 47,59 – 13,06 =	34,53 lbs =	6,36%
N_2 =	393,93 lbs =	72,78%
	541,26 lbs	100,00%

5.
S cargado en piritas = 100·(64/120) = 53,34 lbs.
S en SO_3 al final = 110,62·(32/80) = 44,25 lbs.
Grado de conversión = 44,25/53,34 = 0,8296
Grado de conversión = 82,96% (65-5)

EJERCICIO N°66 (8)

En el proceso Deacon para producción de cloro, una mezcla seca de ácido clorhídrico gaseoso y aire, se pasa por un catalizador caliente que produce la oxidación del ácido.

El aire utilizado está en un 30% de exceso del que se necesita teóricamente.

PREGUNTAS

1. Calcúlese el peso de aire suministrado por libra de ácido.
2. Calcúlese la composición en peso del gas que entra a la cámara de reacción.
3. Suponiendo que en el proceso se oxida el 60% del ácido, calcúlese la composición en peso de los gases que salen de la cámara.

SOLUCION

1.
Reacción:
$2HCl + ½ O_2 = H_2O + Cl_2$
Para 1 libra de HCl:
$O_2 = 1·(359x0,5/2x36,3) = 2,459\ ft^3$
Aire teórico = 2,459/0,21 = 11,709 ft^3
Aire suministrado = 11,709x1,3 = 15,222 ft^3
Aire suministrado = 15,222·(29/359) = 1,229 lbs.
Aire suministrado = 1,23 lbs (66-1)

2.
Gas que entra a la cámara de reacción (66-2)

N_2 = 1,2296x0,768 = 0,9443 lbs = 42,35%
O_2 = 1,2296x0,232 = 0,2853 lbs = 12,80%
HCl = 1,0000 lbs = 44,85%
2,2296 lbs= 100,00%

3.
Se le carga la misma cantidad de aire, pero solo se oxida el 60% del HCl:

O_2 para oxidación = 0,6·(16/2x36,5) = 0,1315 lbs
$O_2 \rightarrow$ gas = 15,222x0,21·(32/359) – 0,1315 = 0,1534 lbs.
H_2O = 0,60·(18/2x36,5) = 0,1479 lbs
Cl_2 = 0,60·(71/2x36,5) = 0,5836 lbs.
Composición del gas que sale (66-3)

N_2 = 0,9443 lbs = 42,37%
O_2 = 0,1534 lbs = 6,88%
H_2O = 0,1479 lbs = 6,63%
Cl_2 = 0,5836 lbs = 26,94%
HCl = 0,4000 lbs = 17,94%
2,2292 lbs 100,00%

EJERCICIO N°67 (8)

Un carbón que tiene un 87% de carbono total y un 7% de hidrógeno no oxidado, se quema en aire.

PREGUNTAS

1. Si se utiliza un 40% de aire en exceso del teóricamente requerido, calcúlese el número de libras de aire empleado por libra de carbón cargado.
2. Calcúlese la composición en peso de los gases que salen del horno, supuesta la combustión completa.

SOLUCION

1.

Reacción de combustión:

$$C + O_2 = CO_2$$

Si partimos de 1 libra carbón:

$C = 0{,}87$ lbs

O_2 del $C = 0{,}87\cdot(359/12) = 26{,}03$ ft^3.

Aire teórico = $26{,}03/0{,}21 = 123{,}94$ ft^3

Aire total = $123{,}94 \times 1{,}4 = 173{,}52$ ft^3

Aire total = $173{,}52\cdot(29/359) = 14{,}02$

Aire total = 14,02 lbs/lb. de carbón (67-1)

2.

Gases que salen (67-2)

$O_2 = (173{,}52 - 123{,}94) \times 0{,}21\cdot(32/359) =$	0.93 lbs =	6,25%
$H_2 =$	0,07 lbs =	0,47%
$CO_2 = 0{,}87\cdot(44/12) =$	3,19 lbs =	21,44%
$N_2 = 173{,}52 \times 0{,}79\cdot(28/359) =$	10,69 lbs =	71,84%
	14,88 lbs =	100,00%

EJERCICIO Nº68 (8)

Ha de proyectarse un horno para quemar coque a la velocidad de 200 libras por hora. El coque tiene la siguiente composición:

C	89,1%
Cenizas	10,9%

La eficiencia de la parrilla del horno es tal que se quema el 90% del carbono presente en la carga de coque.

Se suministra aire en exceso del 30% del necesario para la combustión completa de todo el carbono de la carga.

Se supone que el 97% del carbono se oxida a dióxido, formando monóxido el restante.

PREGUNTAS

1. Calcular la composición en volumen, de los gases de chimenea que salen del horno.
2. Si los gases de chimenea abandonan el horno a la temperatura de 550ºF y a una presión de 743 mm Hg., calcúlese la velocidad de flujo de los gases, en pies cúbicos por minuto; para la cual debe proyectarse el tubo de la chimenea.

SOLUCION

1.

Supongamos 200 lbs. de coque:

C en coque = $200 \times 0{,}891 = 178{,}2$ lbs.

Reacciones:

$C + O_2 = CO_2$

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$

$C \rightarrow CO_2 = 178{,}2 \times 0{,}9 \times 0{,}97 = 155{,}57$ lbs.

$C \rightarrow CO = 178{,}2 \times 0{,}9 \times 0{,}03 = 4{,}81$ lbs.

Si todo el C pasara a CO_2:

O_2 del $C = 178{,}2\cdot(359/12) = 5331{,}15$ ft^3

Aire teórico = 5331,15/0,21 = 25386,43 ft^3
Aire total = 25386,43x1,3 = 33002,36 ft^3
Aire exceso = 33002,36 – 25386,43 = 7616 ft^3

Para las reacciones reales planteadas al principio:
$O_2 = CO_2$ = 155,57·(359/12) = 4654,14 ft^3
O_2 para el CO = 4,81·(0,5x359/12) = 71,95 ft^3
CO = $2O_2$ para CO = 2x71,95 = 143,90 ft^3
O_2 de estas reacciones = 4654,14 + 71,95 = 4726,09 ft^3

Composición del gas (68-1)

N_2 = 4726,09·(79/21) + 7616x0,79 =	23795,74 ft^3 = 78,81%
O_2 = 7616x0,21 =	1599,36 ft^3 = 5,30%
CO_2 =	4654,14 ft^3 = 15,41%
CO =	143,90 ft^3 = 0,48%
	30193,14 ft^3 = 100,00%

2.
Los gases calculados a C.N, representan un flujo de 30193,14 ft^3/hr
Gases C.N = 30193,74/60 = 503,23 ft^3/min

Cambio de cóndiciones:

V_1 = 503,23 ft^3/min $\quad$ V_2 =?
P_1 = 760 mm $\quad$ P_2 = 743 mm
T_1 = 492°R $\quad$ T_2 = 550+460 = 1010°R

V_2 = 503,23·(760/743) · (1010/492) = 1056,7
Velocidad de flujo a C.D = 1056,7 ft^3/min. (68-2)

EJERCICIO N°69 (8)

El gas procedente de un horno para azufre tiene la siguiente composición, en volumen:

SO_3	0,8%
SO_2	7,8
O_2	12,2
N_2	79,2

PREGUNTAS

1. Calcúlese el volumen del gas a 600°F y 29,2 pulgadas de Hg., formado por libra de azufre que se ha quemado.
2. Calcúlese el porcentaje en exceso de oxígeno que se ha formado para la combustión anterior, del necesario para la oxidación completa a SO_3.
3. Calcúlese el volumen de aire suministrado a 10°F y 29,2 pulgadas de mercurio para la combustión, por libra de azufre quemado.

SOLUCION

1.
Cálculo del volumen de gas a C.N:
Recordemos la ecuación (6):
S total en gas = 1 lb.
S/ft^3 de gas = S en SO_2 + S en SO_3
Si asumimos 1 ft^3 de gas:
S/ft^3 de gas = 0,008x(32/359) + 0,078x(32/359) = 0,00767 lb/ft^3
ft^3 de gas a C.N = 1/0,00767 = 130,45

Cambiamos de condiciones:

$V_1 = 130,45\ ft^3$ $V_2 = ?$
$P_1 = 29,92$ in-Hg. $P_2 = 29,2$ in-Hg.
$T_1 = 492°R$ $T_2 = 600 + 460 = 1060°R$
$V_2 = 130,45\cdot(29,92/492)\cdot(1060/29,2) = 287,98$

Volumen del gas a C.D = 288 ft^3 (69-1)

2.
Si todo el $S \rightarrow SO_3$ ∴

$S + 1,5\ O_2 \rightarrow SO_3$
$O_2 = 1x(1,5x359/32) = 16,83\ ft^3$
O_2 en exceso = $130,45x0,122 = 15,92\ ft^3$
O_2 en exceso = $15,92/16,83 = 0,9459$

O_2 en exceso = 94,59% (69-2)

3.
A C.N, el volumen de gas producido por libra de S quemado = $130.45\ ft^3$

Aire a C.N = $130,45\cdot(0,792/0,79) = 130,78\ ft^3$

Cambio de condiciones:

$V_1 = 130,78\ ft^3$ $V_2 = ?$
$P_1 = 29,92$ in $P_2 = 29,2$ in
$T_1 = 492°R$ $T_2 = 460 + 10 = 470°R$
$V_2 = 130,78\cdot(29,92/492)\cdot(470/29,2) = 128,01$

Volumen de aire a C.D = 128 ft^3 (69-3)

EJERCICIO N°70 (11)

Un gas combustible que contiene 40%CO, 10%CO_2 y 50%N_2 (en volumen), es quemado completamente con aire en un horno.

Las temperaturas de entrada y de salida de los gases en el horno son 500°c y 977°C, respectivamente.

PREGUNTAS

1. Calcular la máxima temperatura de la llama.

SOLUCION

1.
Algunos datos:
Calores de formación a 25°C (298K): = $\Delta H°_{298}$ (cal/mol):

$\Delta H°_{298}$, CO = - 29400
$\Delta H°_{298}$, CO_2 = - 94000
Capacidades caloríficas, C_p (cal/mol.K):

$C_p, CO = 6,8 + 0,95x10^{-3}T - 0,1x10^5T^{-2}$
$C_p, CO_2 = 10,6 + 2,2x10^{-3}T - 2,0x10^5T^{-2}$
$C_p, O_2 = 7,15 + 0,98x10^{-3}T - 0,4x10^5T^{-2}$
$C_p, N_2 = 6,7 + 1,0x10^{-3}T$

Vamos a utilizar la ecuación (7) para calcular el contenido de calor con que los gases entran al horno:

$$CO = \int_{298}^{773}\left(6{,}8 + 0{,}95x10^{-3}T - 0{,}1x10^{5}T^{-2}\right)dT = 1380{,}4\ \text{Cal}$$

$$CO_2 = 0{,}1\int_{298}^{773}\left(10{,}6 + 2{,}2x10^{-3}T - 2{,}0x10^{5}T^{-2}\right)dT = 518{,}2\ \text{Cal}$$

$$N_2 = 0{,}5\int_{298}^{773}\left(6{,}7 + 1.0x10^{-3}T\right)dT = 1718{,}4\ \text{Cal}$$

Calor de entrada del gas = 1380,4 + 518,2 + 1718,4 = 3617 Cal.

Calor generado por la combustión:

$CO + ½\ O_2 = CO_2$

$\Delta H^{o}_{298} = \Delta H^{o}_{298}, CO + \Delta H^{o}_{298}, CO_2$

$\Delta H^{o}_{298} = -94000 + 26400 = -67600$ cal.

Productos de combustión = CO_2(combustible) + CO_2(reacción) + N_2(combustible) + N_2(aire):

O_2 de reacción = 0,4x0,5

P.C = 0,1+ 0,4 + 0,5 + 0,5x0,4·(79/21) = 1,7524 ft^3

Aire = 0,4x0,5/0,21 = 0,9524 ft^3

N_2, aire = 0,7524 ft^3; O_2, aire = 0,2 ft^3

Calor de entrada del aire:

N_2 = 1718,4·(0,7524/0,5) = 2585,85 Cal.

$$O_2 = 0{,}2\int_{298}^{773}\left(7{,}15 + 0{,}98x10^{-3}T - 0{,}2x10^{5}T^{-2}\right)dT = 713\ \text{Cal}$$

Total calor de entrada = 3617 + 2585,85 + 713 = 6916 Cal.

Total calor disponible = 6916 + 67600 = 74516 Cal

Total calor disponible = Calor en productos de combustión.

Si Tm = temperatura de la llama:

$$\text{Calor en los P.C} = \int_{298}^{Tm}\sum C_p, P.C.dT$$

$\sum C_p$, P.C = C_p, CO_2 + C_p, N_2

$\sum C_p$,P.C = $17{,}3 + 3{,}2x10^{-3}T - 2{,}0x10^{5}T^{-2}$ ∴

$$74516 = 1{,}7524\int_{298}^{Tm}\left(17{,}3 + 3{,}2x10^{-3}T - 2x10^{5}T^{-2}\right)dT\ \therefore$$

$74516 = 30{,}3165Tm + 2{,}804x10^{-3}T + 3{,}505x10^{5}Tm^{-1} - 10459$

Si despreciamos Tm^{-1}, nos resulta:

Tm = 2310K = 2037°C

Temperatura máxima de la llama = 2037°C (70-1

CAPITULO V

PRODUCCION DE COQUE Y GAS

EJERCICIO N°1 (7)

Un carbón en convertido en coque, y las respectivas composiciones se presentan a continuación:

Carbón (%)		Coque (%)	
C	76,3	C	90,8
H	5,4	H	0,4
O	8,8	O	0,9
N	1,8	S	1,0
S	1,2	R	6,9
H_2O	1,9		
R	4,6		

PREGUNTAS

1. El peso del coque por tonelada de carbón.
2. La potencia calorífica baja de cada uno.
3. El porcentaje del calor original del carbón, que puede ser obtenido quemando el coque.
4. Calcular el volumen de los productos de combustión, si el coque es quemado con 50% de aire en exceso. El aire está a 27°C, 765 mm de presión y con 60% de humedad.

SOLUCION

1.
Las cenizas y el residuo (R) del carbón, permanecen en el coque; por esta razón, se puede escribir la siguiente expresión:

$$\text{Peso de R en carbón} = \text{Peso de R en coque} \quad (1)$$

Peso de R en carbón = %R en carbón x peso del carbón
Peso de R en coque = %R en coque x peso del coque.
$0,046x1000 = 0,069x$peso del coque ∴
Peso del coque = 1000x0,046/0,069 = 667
Peso del coque = Kg. 667 (1-1)

2.
Potencia calorífica baja (P.C.B):
$P.C.B = 8100C + 34000\cdot(H - O/8) + 2200S - 586\cdot(9H + W)$
Para el carbón:
$P.C.B = 8100x0,763 + 34000\cdot(0,054 - 0,088/8) + 2200x0,012 - 586\cdot(9x0,054 + 0,019)$
$= 7372$
P.C.B para el carbón = 7372 Kcal/Kg. (1-2)

Para el coque:
$P.C.B = 8100x0,908 + 34000\cdot(0,0004 - 0,009/8) + 2200x0,01 - 586\cdot(9x0,004 + 0)$
$= 7455$
P.C.B para el coque = 7455 Kcal/Kg. (1-2)

3. La potencia calorífica obtenida para el coque viene expresada para 1 Kg., pero 1 Kg. de carbón solo produce 0,667 Kg. de coque, por tanto, la potencia calorífica del coque habrá que multiplicarla por este valor = 7455x0,667 ∴

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de coque y los metros cúbicos de gas producidos, a partir de 1 tonelada métrica de carbón.

2. ¿Cuántos metros cúbicos de aire serían necesarios, teóricamente, para quemar 1 metro cúbico de gas?

SOLUCION

1.

Peso de R en carbón = Peso de R en coque:

0,05x1000 = 0,08 x peso del coque ∴

Peso del coque = 0,05x1000/0,08 = 625 kg.

Peso del coque = 625 Kg. (2-1)

Para calcular el volumen de gas producido, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen de gas} = \frac{\text{C total en gas}}{C/\text{m}^3 \text{ de gas}} \qquad (2)$$

C total en gas = C en carbón – C en coque

C total en gas = 1000x0,8 – 625x0,92 = 225 Kg.

Para encontrar el peso (kilogramos) de C en 1 m^3 de gas: El volumen de CH_4 es 0,35 m^3; y puesto que 22,4 m^3 de CH_4 contienen 12 Kg. de C, 1 m^3 de CH_4 contiene 12/22,4 Kg. de C y el CH_4 presente contiene 0,35·(12/22,4) = 0,1875 Kg. Similarmente, el C_2H_4 (que tiene 2 átomos de C) debe contener 0,04x2x(12/22,4) = 0,0428 Kg. De esta manera su puede proceder con todos los demás constituyentes del gas que contengan C.

El cálculo se hace más rápido, sumando primero los porcentajes multiplicados por los respectivos átomos de C, y esta suma multiplicarla por 12/22,4 que es un factor común, veamos:

C en 1 m^3 de gas:

En C_2H_4 = 2x0,04 = 0,08
En CH_4 = 1x0,35 = 0,35
En CO = 1x0,08 = 0,08
En CO_2 = 1x0,04 = 0,04
0,55

C/m^3 de gas = 0,55·(12/22,4) = 0,2948 Kg./m^3 de gas ∴
Gas = 225/0,2948 = 764 m^3

Volumen del gas producido = 764 m^3 (2-1)

2.

Reaccione de combustión:

$$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$$
$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$$
$$2CO + O_2 = 2CO_2$$
$$2H_2 + O_2 = 2H_2O$$

Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

O_2 del C_2H_2 = 0,04x3 = 0,12 m^3
O_2 del CH_4 = 0,35x2 = 0,70 m^3
O_2 del CO = 0,08x0,5 = 0,04 m^3
O_2 del H_2 = 0,44x0,5 = 0,22 m^3
Total O_2 = 1,08 m^3

Aire teórico = 1,08/0,21 = 5,14 m^3

Aire teórico = 5,14 m^3/m^3 de gas (2-2)

EJERCICIO N°3 (7)

El coque producido en una planta para coque con recuperación de subproductos, presenta el siguiente análisis:

C	88,2%
H	0,2
R	11,6

El carbón utilizado, presenta el siguiente análisis:

C	75,2%	N	3,5%
H	3,5	H_2O	4,6
R	7,4	O	5,8

El análisis (seco) del gas producido, fue el siguiente:

H_2	56,4%	CO_2	1,7%
CH_4	28,2	CO	6,1
C_2H_4	2,2	O_2	0,5
C_6H_6	0,8	N_2	4,1

El alquitrán obtenido por tonelada de carbón, lleva 107 libras de carbono, y otros productos 4 libras de C.

PREGUNTAS

1. Calcular las libras de coque producido, a partir de 2000 libras de carbón.
2. Calcular los pies cúbicos de gas (seco) producido, a partir de 1 tonelada de carbón.
3. Calcular el porcentaje del calor original del carbón que está presente en el coque.
4. Calcular el porcentaje del calor original del carbón que está presente en el gas.

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = peso de R en carbón

0,116xPeso del coque = 0,074x2000 ∴

Peso del coque = 0,074x1000/0,116 = 1275 lbs.

Peso del coque = 1275 lbs. (3-1)

2.

Vamos a utilizar la ecuación (2):

Cálculo del C que hay en 1 ft^3 de gas:

En CH_4 = 1x0,282 = 0,282
En C_2H_4 = 2x0,022 = 0,044
En C_6H_6 = 6x0,008 = 0,048
En CO_2 = 1x0,017 = 0,017
En CO = 1x0,061 = 0,061

0,452

C = 0,452·(12/359) = 0,0151 lbs./ft^3 de gas

C total en gas = C en carbón – C en coque – C en alquitrán – C en otros.

C en carbón = 2000x0,752 = 1504 lbs.

C en coque = 1275x0,882 = 1125 lbs.

C total en gas = 1504 – 1125 – 107 – 4 = 270 lbs.

Gas = 270/0,0151 = 17800 ft^3

Gas = 17800 ft^3 (3-2)

3.

Fórmula de Dulong:

P.C.B = 14600C + 61000·(H – O/8) + 4000S – 1050·(9H + W) = BTU/lb.

Para el carbón:

P.C B = 14600x0,752 + 61000·(0,035 – 0,058/8) + 4000x0 – 1050·(9x0,035 + 0,046)
= 12293 BTU/lb

Para el coque:

P.C.B = 14600x0,882 + 61000·(0,002 – 0) – 1050·(9x0.002 + 0)
= 12980 BTU/lb.

1 libra de carbón produce 1275/2000 = 0,635 lbs. de coque ∴

P.C.B del coque = 0,635x12980 = 0,672 de la del carbón

P.C.B del coque = 67,2% de la del carbón (3-3)

4.

Con la ayuda de la Tabla L del Apéndice se puede calcular la potencia calorífica del gas, así:

Para 1 ft^3 de gas:

H_2 = 0,564x290 =	164 BTU
CH_4 = 0,282x962 =	271 BTU
C_2H_4 = 0,022x1627 =	36 BTU
C_6H_6 = 0,008x3763 =	30 BTU
CO = 0,061x341 =	21 BTU
P.C.B del gas =	522 BTU/ft^3

1 lb. de carbón produce 17800/2000 = 8,9 ft^3 de gas ∴

P.C.B del gas = 8,9x522/12293 = 0,378 de la del carbón.

P.C.B del gas = 37,8% de la del carbón (3-4)

EJERCICIO N°4 (7)

Un horno para coque con recuperación de subproductos, utiliza carbón y produce coque, la composición de los cuales es la siguiente:

CARBON (%)		COQUE (%)	
C	76,5	C	91,7
H	6,8	H	0,2
O	6,4	R	8,1
N	1,8		
H_2O	3,0		
R	5,5		

El gas que sale de las retortas, analizado en seco, presenta la siguiente composición:

CH_4	29,0%	H_2	55,4%
C_2H_4	3,5	N_2	4,2
CO_2	1,4	NH_3	1,4
CO	5,1		

La temperatura del gas al salir de las retortas es de 1000°C.

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de carbón requeridos para producir una tonelada métrica de coque, y los metros cúbicos de gas seco que salen de la retorta; por tonelada métrica de coque producido.

2. Cuando el coque es quemado, ¿qué porcentaje de la potencia calorífica original del carbón es obtenido?.

3.
   a. ¿Qué porcentaje de la potencia calorífica original del carbón está representado por la del gas producido?
   b. ¿Cuál es el contenido de calor sensible de los gases, tal como ellos salen de la retorta?

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = Peso de R en carbón ∴

Peso del carbón = 1000·(0,081/0,055) = 1473 Kg.

Peso del carbón = 1473 Kg. (4-1)

C en gases:

CH_4 = 1x0,29 = 0,290
C_2H_4 = 2x0,035 = 0,070
CO_2 = 1x0,014 = 0,014
CO = 1x0,051 = <u>0,051</u>
0,425

C = 0,425·(12/22,4) = 0,2278 Kg/m^3 de gas.
C total en gas = 1473x0,765 – 1000x0,917 = 210 Kg.
Gas = 210/0,2278 = 917 m^3

Gas = 917 m^3/ton. de coque (4-1)

2.

Cálculo de las potencias caloríficas para el carbón y el coque, mediante la fórmula de Dulong:

P.C.B (carbón) = 8100x0,765 + 34000·(0,068 – 0,064/8) + 0 – 586·(9x0,068 + 0,03)
= 7860 Kcal/Kg.

P.C.B (coque) = 8100x0,917 + 34000x0,002 – 586x9x0 002 = 7485 Kcal/Kg.

1 Kg. de carbón produce 1000/1473 = 0,679 Kg. de coque. ∴

P.C.B del coque = 0,679·(7485/7860) = 0,646 de la del carbón

P.C.B del coque = 64,6% de la del carbón (4-2)

3.

a.

Cálculo de potencia calorífica del gas (Tabla L):

CH_4 = 0,29x8560 = 2482 Kcal
C_2H_4 = 0,035x14480 = 507
CO = 0,051x3034 = 155
H_2 = 0,554x2582 = 1430
NH_3 = 0,014x3565 = <u>47 Kcal</u>
P.C.B del gas = 4621 Kcal

1 Kg. de carbón produce 917/1473 = 0,623 m^3 de gas

P.C.B del gas = 0,623·(4621/7860) = 0,366 de la del carbón

P.C.B del gas = 36,6% de la del carbón (4-3.a)

b.

Sabemos que el contenido de calor de un gas = Volumen x Calor específico x Temperatura (°C)
Este cálculo se realiza con ayuda de la Tabla XV del Apéndice:

$CH_4 = 0{,}29\cdot(0{,}380 + 21x10^{-5}x1000)x1000 =$ 717 Kcal
$C_2H_4 = 0{,}035\cdot(0{,}460 + 30x10^{-5}x1000)x1000 =$ 27
$CO_2 = 0{,}014\cdot(0{,}406 + 9x10^{-5}x1000)x1000 =$ 7
$CO+N_2 = 0{,}093\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x1000)x1000 =$ 30
$H_2 = 0{,}554\cdot(0{,}301 + 2{,}0x10^{-5}x1000)x1000 =$ 178
$NH_3 = 0{,}014\cdot(0{,}376 + 14x10^{-5}x1000)x1000 =$ 7 Kcal
Contenido de calor en el gas = 420 Kcal/m^3
Calor total en el gas = 420x917 = 385140 Kcal.

Calor total en el gas = 385140 Kcal (4-3.b)

EJERCICIO Nº5 (7)

Los siguientes datos fueron obtenidos de la operación de una planta para coque con recuperación de subproductos de la Lackwanna Steel Company

CARBON UTILIZADO (%)		COQUE PRODUCIDO (%)		GAS PRODUCIDO (análisis seco), %	
C	76,8	C	91,7	CH_4	28,5
H	3,5	H	0,2	C_2H_4	2,2
O	6,5	R	8,1	C_6H_6	0,7
N	1,7			CO_2	1,4
H_2O	5,7			CO	5,1
R	5,8			H_2	56,0
				O_2	0,5
				N_2	4,2
				NH_3	1,4

Por cada tonelada de carbón utilizado, se produjeron 62,2 kilogramos de alquitrán cuyo análisis contenía 77,7%C y 16,1%H.

PREGUNTAS
(por tonelada de carbón cargado)

1. Peso del coque producido.
2. El volumen del gas producido, análisis seco y húmedo.
3. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón que está presente en el coque.
4. Lo mismo para el gas producido.
5. Cuantos kilogramos de benzol (C_6H_6) y de sulfato de amonio [$(NH_4)_2\cdot SO_4$] serían recuperables?

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = Peso de R en carbón ∴

Peso del coque = 1000·(0,058/0,081) = 716 Kg.

Peso del coque = 716 Kg. (5-1)

2.

Utilizando la ecuación (2):
C total en gas = C(carbón) – C(coque) – C(alquitrán)

C total en gas = 0,768x1000 – 0,917x716 – 0,777x62,2 = 63 Kg.

Cálculo del C que tiene 1 m^3 de gas:

En CH_4 = 1x0,285 = 0,285
En C_2H_4 = 2x0,022 = 0,044
En C_6H_6 = 6x0,007 = 0,042
En CO_2 = 1x0,014 = 0,014
En CO = 1x0,051 = 0,051
0,436
C en gas = 0,436·(12/22,4) = 0,2335 Kg./m^3 de gas
Gas = 63/0,2335 = 270 m^3
Gas producido (análisis seco) = 270 m^3 (5-2)

Para el cálculo del gas producido, húmedo, se utiliza misma ecuación (2) pero ahora se sustituye el C por el H:

Puesto que 1 volumen de CH_4 representa 2 volúmenes de H_2, 0,285 m^3 de CH_4 contienen 0,57 m^3 de H_2, así:

En CH_4 = 0,285x2 = 0,570
En C_2H_4 = 0,022x2 = 0,044
En C_6H_6 = 0,007x3 = 0,021
H_2 libre = 0,560
En NH_3 = 0,014x1,5 = 0,021
1,216
H_2 = 1,216·(2/22,4) = 0,108 Kg./m^3 de gas
H_2 libre en carbón = 0,035x1000 = 35 Kg.
H_2 en H_2O del carbón = 1000x0,057·(2/18) = 6,32 Kg.
Total H_2 del carbón = 35+6,32 = 41,32 Kg.
H_2 en coque = 716x0,002 = 1,43 Kg.
H_2 el alquitrán = 62,2x0,161 = 10,01 Kg.
H_2 total en gas = 41,32 – 1,43 – 10,01 = 29,88 Kg.
Gas = 29,88/0,108 = 277 m^3
Gas, análisis húmedo = 277 m^3 (5-2)

3.
P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W):
Para el carbón:
P.C.B = 8100x0,768 + 34000·(0,035 – 0,065/8) + 0 – 586·(9x0,035 + 0,057)
= 6921 Kcal/Kg.
Para el coque:
P.C.B = 8100x0,917 + 34000·(0,002 – 0) + 0 – 586x0,002 = 7485 Kcal/Kg.
P.C.B del coque = 0,716x7485/6921 = 0,775 de la del carbón.
P.C.B del coque = 77,5% de la del carbón (5-3)

4.
Potencia calorífica del gas:
CH_4 = 0,285x8560 = 2440 Kcal.
C_2H_4 = 0,022x14480 = 319
C_6H_6 = 0,007x33490 = 234
CO = 0,051x3034 = 155
H_2 = 0,56x2582 = 1446
NH_3 = 0,014x3385 = 47 Kcal.
P.C.B del gas = 4641 Kcal/m^3
P.C.B del gas = 0,270·(4641/6921) = 0,179 de la del carbón
P.C.B del gas = 17,9% de la del carbón (5-4)

5.
Pesos moleculares:
C_6H_6 = 78
NH_3 = 17
$(NH_4)_2 \cdot SO_4$ = 132
C_6H_6 en gas = 0,007x270 = 1,89 m^3
C_6H_6 = 1,89·(78/22,4) = 6,58 Kg.

C_6H_6 recuperable = 6,58 Kg. (5-5)

Reacción de formación del sulfato de amonio:

$$2NH_3 + H_2 + S + 2O_2 = (NH_4)_2 \cdot SO_4$$

NH_3 en gas = 270x0,014 = 3,78 m^3

= 3,78·(17/22,4) = 2,87 Kg.

$(NH_4)_2 \cdot SO_4$ = 2,87·(132/2x17) = 11,14 Kg.

Sulfato de amonio recuperable = 11,14 Kg. (5-5)

EJERCICIO N°6 (7)

El carbón de la siguiente composición, fue tratado en un horno para coque con recuperación de subproductos.

C	78,0%	O	9,0%
H	5,0	N	1,5
R	6,5		

El análisis del coque producido fue el siguiente:

C	89,5%
H	1,0
R	9,5

El gas del horno analizó lo siguiente:

C_6H_6	0,8%	CO_2	3,3%
C_2H_4	3,0	H_2	44,3
CH_4	34,0	N_2	7,2
CO	6,0	NH_3	1,4

En adición, se recobró alquitrán igual al 3,4% del peso del carbón, conteniendo 90%C.

PREGUNTAS

1. Las libras de carbón requeridas para producir una tonelada larga de coque, y los pies cúbicos de gas producido.
2. Las libras de benzol y sulfato de amonio recuperados, por tonelada larga de carbón.
3. Las potencias caloríficas del carbón, el coque y el gas.
4. Los porcentajes de la potencia calorífica del carbón que están presentes en el coque y el gas.

SOLUCION

1.

1 tonelada larga = 2240 libras.

Peso de R en coque = Peso de R en carbón.

Peso del carbón = 2240·(0,095/0,065) = 3270 lbs.

Peso del carbón = 3270 lbs. (6-1)

Para el cálculo del volumen del gas, utilizamos la ecuación (2):

C en carbón = 3270x0,78 = 2551 lbs.

C en coque = 2240x0,895 = 2005 lbs.

Alquitrán = 3270x0,034 = 111,18 lbs.

C en alquitrán = 111,18x0,9 = 100 lbs.

Total C en gases = 2551 – 2005 – 100 = 446 lbs.

C en gas:

En C_6H_6 = 6x0,008 = 0,048
En C_2H_4 = 2x0,03 = 0,060
En CH_4 = 1x0,34 = 0,340
En CO = 1x0,06 = 0,060
En CO_2 = 1x0,033 = 0,033
0,541
C en gas = 0,541·(12/359) = 0,0181 lbs/ft^3 de gas
Gas = 446/0,0181 = 24641 ft^3
Gas producido = 24641 ft^3 (6-1)

2.

Peso del coque = 2240·(0,065/0,095) = 1530 lbs.
Peso del alquitrán = 2240x0,034 = 76,16 lbs.
C en carbón = 2240x0,78 = 1747 lbs.
C en coque = 1530x0,895 = 1369 lbs.
C en alquitrán = 76,16x0,9 = 69 lbs.
C total en gas = 1747 – 1369 – 69 = 309 lbs.
Gases = 309/0,0181 = 17072 ft^3
C_6H_6 = 17072x0,008 = 137 ft^3
Benzol recuperado = 137·(78/359) = 29,5 lbs.
Benzol recuperado = 29,5 lbs (6-2)

Reacción de formación del sulfato de amonio:

$$2NH_3 + H_2 + S + 2O_2 = (NH_4)_2 \cdot SO_4$$

NH_3 en gas = 0,014x17072·(17/359) = 11,32 lbs.
$(NH_4)_2 \cdot SO_4$ = 11,32·(132/2x17) = 43,94 lbs.
Sulfato de amonio recuperado = 43,94 lbs. (6-2)

3.
P.C.B = 14600C + 61000(H – O/8) + 4000S – 1050·(9H + W)
Para el carbón:
P.C.B = 14600x0,78 + 61000·(0,05 – 0,09/8) – 1050x9x0,05 = 13279 BTU
P.C.B del carbón = 13279 BTU/lb (6-3)

Para el coque:
P.C.B = 14600x0,895 + 61000x0,01 – 1050x9x0,01 = 13582 BTU
P.C.B del coque = 13582 BTU/lb (6-3)

Para el gas:

C_6H_6 = 0,008x3763 = 30 BTU
C_2H_4 = 0,03x1627 = 49
CH_4 = 0,34x962 = 327
CO = 0,06x341 = 20
H_2 = 0,443x290 = 129
NH_3 = 0,014x380 = 5 BTU
560 BTU/ft^3
P.C.B del gas = 560 BTU/ft^3 (6-3)

4.
1 libra de carbón produce 1530/2240 = 0,685 lbs de coque.
P.C.B del coque = 0,685·(13582/13279) = 0,7 de la del carbón
P.C.B del coque = 70,0% de la del carbón (6-4)

1 libra de carbón produce 10072/2240 = 7,58 ft^3 de gas
P.C.B del gas = 7,58·(560/13279) = 0,319 de la del carbón
P.C.B del gas = 31,9% de la del carbón (6-4)

EJERCICIO Nº7 (7)

Un carbón que fue coquizado en una planta con recuperación de subproductos, tenía la siguiente composición:

C	77,0%	H	5,0%
H_2O	3,0	O	8,0
R	7,0		

El coque resultante presentó la siguiente composición:

C	89,0%
H	1,0
R	10,0

El gas, tal como sale de las retortas, tiene:

H_2	50,0%	N_2	1,4%
CH_4	28,0	CO_2	2,0
CO	8,0	H_2O	6,6
C_2H_4	4,0		

PREGUNTAS

1. El peso del coque y el volumen del gas producidos, por kilogramo de carbón.
2. Cuando se quema el coque, que porcentaje de la potencia calorífica original del carbón se obtiene?
3. Cuando se quema el gas, que porcentaje de la potencia calorífica original del carbón se obtiene?
4. ¿Que temperatura se obtiene al quemar el coque bajo las condiciones teóricas?.
5. ¿Que temperatura se obtiene cuando el gas combuste bajo condiciones teóricas?

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = Peso de R en carbón $\therefore$

Peso de coque = 1x0,07/0,1 = 0,70

Peso del coque = 0,70 Kg./Kg. de carbón (7-1)

Cálculo del volumen del gas producido por Kg. de carbón:

C en carbón = 0,77 Kg.

C en coque = 0,7x0,89 = 0,623 Kg.

C $\rightarrow$ gas = 0,77 – 0,623 = 0,147 Kg.

Cálculo del contenido de C en 1 m^3 de gas:

En CH_4 = 1x0,28 = 0,28

En CO = 1x0,08 = 0,08

En C_2H_4 = 2x0,04 = 0,08

En CO_2 = 1x0,02 = <u>0,02</u>

0,46

C/m^3 de gas = 0,46·(12/22,4) = 0,246 Kg./m^3 de gas

Gas = 0,147/0,246 = 0,597 m^3

Gas producido = 0,597 m^3/Kg. de carbón (7-1)

2.

$P.C.B = 8100C + 34000\cdot(H - O/8) + 2200S - 586\cdot(9H + W)$:

Para el carbón:

$P.C.B = 8100x0{,}77 + 34000\cdot(0{,}05 - 0{,}08/8) + 0 - 586\cdot(9x0{,}05 + 0{,}03) = 7316$ Kcal/Kg.

Para el coque:

$P.C.B = 8100x0{,}89 + 34000\cdot(0{,}01 - 0) + 0 - 586\cdot(9x0{,}01 + 0) = 7496$ Kcal./Kg.

1 Kg. de carbón produce 0,7 Kg. de coque:

P.C.B del coque = $0{,}7\cdot(7496/7316) = 0{,}717$ de la del carbón

P.C.B del coque = 71,7% de la del carbón (7-2)

3.

Para el cálculo de la potencia calorífica del gas, utilizamos la Tabla L del Apéndice:

$H_2 = 0{,}50x2582 =$ 1291 Kcal.
$CH_4 = 0{,}28x8560 =$ 2397 Kcal.
$CO = 0{,}08x3034 =$ 243 Kcal.
$C_2H_4 = 0{,}04x14480 =$ 579 Kcal.
4510 Kcal/m^3

P.C.B del gas = $0{,}597\cdot(4510/7316) = 0{,}368$ de la del carbón.

P.C.B del gas = 36,8% de la del carbón (7-3)

4.

Calor disponible = Calor en productos de combustión
Calor disponible = Volumen o peso de los P.C x Calor específico x Temperatura
Calor disponible en este caso = Potencia calorífica = 7496x0,7 = 5247 Kcal.
Cálculo de los productos de combustión:
$P.C = CO_2 + H_2O + N_2$
Reacciones de combustión:

$$C + O_2 = CO_2$$
$$H_2 + ½\, O_2 = H_2O$$

O_2 del C = $0{,}7x0{,}89\cdot(32/12) = 1{,}66$ Kg.
O_2 del H = $0{,}7x0{,}01\cdot(16/2) = 0{,}056$ Kg.
Total O_2 teórico = $1{,}66 + 0{,}056 = 1{,}716$ Kg.
Aire teórico = $1{,}716/0{,}23 = 7{,}45$ Kg.
$N_2 = 7{,}45x0{,}77 = 5{,}7$ Kg.
$CO_2 = 0{,}7x0{,}89\cdot(44/12) = 2{,}29$ Kg.
$H_2O = 0{,}7x0{,}01\cdot(18/2) = 0{,}063$ Kg.

La Tabla XV del Apéndice contiene los calores específicos de los gases:
El contenido de calor de estos P.C a cualquier temperatura, es el siguiente:

$N_2 = 5{,}7\cdot(0{,}241 + 1{,}8x10^{-5}\,t)\cdot t =$ $1{,}37\,t + 10{,}02x10^{-5}\,t^2$
$CO_2 = 2{,}3\cdot(0{,}205 + 4{,}6x10^{-5}\,t)\cdot t =$ $0{,}47\,t + 10{,}6x10^{-5}\,t^2$
$H_2O = 0{,}063\cdot(0{,}463 + 6{,}2x10^{-5}\,t)\cdot t =$ $0{,}03\,t + 0{,}30x10^{-5}\,t^2$
Total calor a cualquier t en P.C = $1{,}78\,t + 21{,}01x10^{-5}\,t^2$
$5247 = 21{,}01x10^{-5}t^2 + 1.78\,t$ ∴
$t = 2250°C$

Temperatura de la llama al quemar el coque = 2250°C (7-4)

5.

El cuadro que se muestra a continuación, presenta las reacciones de combustión, el oxígeno consumido y los productos de combustión resultantes de quemar 0,597 m^3 de gas:

Reacciones	O_2 + P.C (m^3/0,597 m^3 de gas)			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$	0,1493	---	0,2985	---
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,3343	0,1672	0,3343	---
$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$	0,0239	0,0478	---	---
$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,0716	0,0478	0,0478	---
N_2	---	---	---	0,0084
CO_2	---	0,0119	---	---
H_2O	---	---	0,0394	---
Totales	0,5791	0,2747	0,7200	0,0084

$$\text{Aire teórico} = 0,5791/0,21 = 2,7576 \text{ m}^3$$

$$P.C = N_2 + CO_2 + H_2O$$

$$N_2 \text{ total} = 2,7576x0,79 + 0,0084 = 2,1869 \text{ m}^3$$

Cálculo del contenido de calor de los P.C a cualquier temperatura:

$$N_2 = 2,1869 \cdot (0,302 + 2,2x10^{-5}\, t) \cdot t =$$
$$H_2O = 0,72 \cdot (0,373 + 5,0x10^{-5}\, t) \cdot t =$$
$$CO_2 = 0,2747 \cdot (0,406 + 9,0x10^{-5}\, t) \cdot t =$$
$$\Sigma = \qquad 1,0405\, t + 1,088x10^{-4}\, t^2$$

$$\text{P.C.B del gas} = 0,597x4510 = 2692,5 \text{ Kcal.}$$
$$1.088x10^{-4}\, t^2 + 1,0405\, t - 2692,5 = 0 \; \therefore$$
$$t = 2118,4°C$$

Temperatura obtenida al quemar el gas = 2118,4°C (7-5)

EJECICIO N°8 (7)

Los siguientes son los datos obtenidos de un horno para coque con recuperación de subproductos, que opera con un carbón de Cape Breton, Nova Scotia:

CARBON (%)		COQUE (%)		ALQUITRAN (%)		GAS (%)	
C	76,6	C	87,1	C	89,0	C_6H_6	0,8
H	5,1	H	1,1	H	5,0	C_2H_4	3,0
O	7,2	O	1,9	N	1,0	CH_4	34,[illegible]
N	2,5	N	0,7			CO	9,0
S	2,8	S	1,0			CO_2	6,0
R	5,8	R	8,2			H_2	38,[illegible]
						N_2	7,4
						O_2	1,3

El peso del alquitrán producido equivale al 3,38% del peso del carbón utilizado. El 20% del nitrógeno del carbón se recupera como amonio.

PREGUNTAS

1. Las libras de coque producido, por tonelada corta de carbón.
2. Los pies cúbicos de gas producidos, por tonelada de carbón.
3. El porcentaje de distribución del carbono y el hidrógeno del carbón en el coque, el alquitrán y el gas.
4. La fuga de aire hacia el gas, por tonelada de carbón.
5. Cuantas libras de benzol y de $(NH_4)_2 \cdot SO_4$ pueden ser obtenidas a partir del gas, por tonelada de carbón?

SOLUCION

1.
1 tonelada corta = 2000 libras.

Peso de R en coque = Peso de R en carbón ∴
Peso del coque = 2000·(0,058/0,082) = 1415 lbs.
Peso del coque producido = 1415 lbs (8-1)

2.
Utilizamos la ecuación (2):

C en carbón = 2000x0,766 = 1532 lbs.
C en coque = 1415x0,871 = 1233 lbs.
Peso del Alquitrán = 2000x0,0338 = 68 lbs.
C en alquitrán = 68x0,89 = 60 lbs.
C total en gases = 1532 – 1233 – 60 = 239 lbs.

Cálculo del C que hay en 1 ft^3 de gas:
En C_6H_6 = 6x0,008 = 0,048
En C_2H_4 = 2x0,030 = 0,060
En CH_4 = 1x0,34 = 0,340
En CO = 1x0,09 = 0,090
En CO_2 = 1x0,06 = 0,060
0,598
C en gas = 0,598·(12/359) = 0,01999 lbs/ft^3
Gas = 239/0,01999 = 11956 ft^3
Gas = 11956 ft^3/ton de carbón (8-2)

3.
C en coque = 1233/1532 = 0,804 del C del carbón
C en coque = 80,4% del C del carbón (8-3)

C en alquitrán = 60/1532 = 0,039 del C del carbón.
C en alquitrán = 3,9% del C del carbón (8-3)

C en gas = 1 – 0,804 – 0,039 = 0,157 del C del carbón.
C en gas = 15,7% del C del carbón (8-3)

H en carbón = 2000x0,051 = 102 lbs
H en coque = 1415x0,011 = 15,6 lbs.
H en coque = 15,6/102 = 0,153 del H del carbón
H en coque = 15,3% del H del carbón (8-3)

H en alquitrán = 68x0,05 = 3,4 lbs.
H en alquitrán = 3,4/102 = 0,033 del H del carbón
H en alquitrán = 3,3% del H del carbón (8-3)

Cálculo del H_2 en 1 ft^3 de gas:
En C_6H_6 = 3x0,008 = 0,024
En C_2H_4 = 2x0,030 = 0,060
En CH_4 = 2x0,034 = 0,680
H_2 libre = 1x0,385 = 0,385
H_2 en gas = 1,149 ft^3/ft^3 de gas.
H_2 total en gas = 1,149x11956 = 13737 ft^3
H total en gas = 13737·(2/359) = 76,5 lbs.
H en gas = 76,5/102 = 0,75
H en gas = 75% del H del carbón (8-3)

4.

Gas = 11956 ft^3

$CO = 11956x0{,}09 = 1076\ ft^3$
$CO_2 = 11956x0{,}06 = 717\ ft^3$
$O_2 = 11956x0{,}013 = 155\ ft^3$
O_2 del carbón = $2000x0{,}072\cdot(359/32) = 1615{,}5\ ft^3$
O_2 del coque = $1415x0{,}019\cdot(359/32) = 301{,}6\ ft^3$

Reacciones:

$C + O_2 = CO_2$: $O_2 = CO_2 = 717\ ft^3$
$C + ½\ O_2 = CO$: $= O_2 = ½\ CO = 1076/2 = 538\ ft^3$
O_2 en productos = $301{,}6 + 717 + 538 + 155 = 1711{,}6\ ft^3$
O_2 del aire = $1711{,}6 - 1615{,}5 = 96{,}1\ ft^3$
Aire → gas = $96{,}1/0{,}21 = 457{,}6\ ft^3$

Aire → gas = 457,6 ft^3 (8-4)

5.

$C_6H_6 = 11956x0{,}008\cdot(78/359) = 20{,}8$ lbs.

Benzol obtenido del gas = 20,8 lbs. (8-5)

Reacción de formación del sulfato de amonio:

$2NH_3 + H_2 + S + 2O_2 = (NH_4)_2\cdot SO_4$
N del carbón = $2000x0{,}025 = 50$ lbs.
$N \rightarrow NH_3 = 50x0{,}2 = 10$ lbs.
$NH_3 = 10\cdot(17/14) = 12{,}14$ lbs.
$(NH_4)_2\cdot SO_4 = 12{,}14\cdot(132/2x17) = 47{,}13$ lbs.

Sulfato de amonio obtenido = 47,13 lbs. (8-5)

EJERCICIO Nº9 (7)

Un carbón de Pocahontas en West Virginia fue utilizado en un horno de colmena para coque:

CARBON UTILIZADO (%)		COQUE PRODUCIDO (%)		GASES DESECHADOS (secados), (%)	
C	84,7	C	89,3	CO_2	14,0
H	4,1	H	0,2	CO	6,4
O	3,6	O	0,2	CH_4	2,4
N	1,0	N	0,3	H_2	3,7
S	0,7	S	0,7	N_2	68,7
H_2O	1,0	H_2O	0,6	H_2O	4,8
R	4,9	R	8,7		

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de coque producidos, por tonelada de carbón.
2. Los metros cúbicos de gas producidos, por tonelada de carbón.
3. Los metros cúbicos de aire utilizados, por tonelada de carbón (utilizar el método del nitrógeno y el del oxígeno).
4. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón, que se encuentra presente en el coque.
5. Lo mismo para los gases.
6. El porcentaje de distribución del carbón y el del hidrógeno, entre el coque y el gas.

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = Peso de R en carbón ∴

Peso del coque = 1000·(0,049/0,087) = 563 Kg.

Peso del coque = 563 Kg. (9-1)

2.

Utilizamos la ecuación (2):

C en carbón = 1000x0,847 = 847 Kg.

C en coque = 563x0,893 = 503 Kg.

C total en gas = 847 – 503 = 344 Kg.

Cálculo del contenido de C en 1 m^3 de gas:

En CO_2 = 1x0,14 = 0,140

En CO = 1x0,064 = 0,064

En CH_4 = 1x0,024 = 0,024

0,228

C en gas = 0,228·(12/22,4) = 0,122 Kg./m^3 de gas

Gas = 344/0,122 = 2820 m^3

Gas = 2820 m^3 (9-2)

3.

Método del nitrógeno:

N_2 en gas = 0,687x2820 = 1937 m^3

N_2 del carbón = 1000x0,01·(22,4/28) = 8 m^3

N_2 del aire = 1937 – 8 = 1929 m^3

Aire = 1929/0,79 = 2442 m^3

Aire por el método del nitrógeno = 2442 m^3 (9-3)

Método del oxígeno:

O_2 en gas = (0,14 + 0,064/2 + 0,048/2) x2820 = 552,72 m^3

O_2 del carbón = 1000x[(0,036 + 0,01x16/18)]·(22,4/32) = 31,42 m^3

O_2 del aire = 552,72 – 31,42 = 521,3 m^3

Aire = 521,3/0,21 = 2482 m^3

Aire por el método del oxígeno = 2482 m^3 (9-3)

4.

Cálculo de la potencia calorífica baja con la fórmula de Dulong:

P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)

Para el carbón:

P.C.B = 8100x0,847 + 34000·(0,041 – 0,036/8) + 2200x0,007 – 586·(9x0,041 + 0,01)
= 7895 Kcal/Kg.

Para el coque:

P.C.B = 8100x0,893 + 34000·(0,002 – 0,002/8) + 2200x0,007 – 586·(9x0,002 + 0,006)
= 7294 Kcal./Kg.

P.C.B del coque = 0,563·(7294/7895) = 0.52 de la del carbón.

P.C.B del coque = 52,0% de la del carbón (9-4)

5.

Cálculo de la potencia calorífica del gas:

$CO = 0,064x3034 =$ 194 Kcal.
$CH_4 = 0,024x8560 =$ 205 Kcal.
$H_2 = 0,037x2582 =$ 96 Kcal
P.C.B del gas = 495 Kcal./m^3
P.C.B del gas = 2,82·(495/7895) = 0,177 de la del carbón.
P.C.B del gas = 17,7% de la del carbón (9-5)

6.
Distribución del C:
En coque = 503/847 = 0,594
C en coque = 59,4% del C del carbón (9-6)

En gas = 344/847 = 0,406
C en gas = 40,6% del C del carbón (9-6)

Distribución del H:
H en carbón = 1000·(0,041 + 0,01x2/18) = 42,111Kg.
H en coque = 563·(0,002 + 0,006x2/18) = 1,501 Kg.

H en gas:
$2H_2 + C = CH_4$
H = 2820x0,024x2·(2/22,4) = 12,086 Kg.
H libre = 2820x0,037·(2/22,4) = 9,316 Kg.
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$
H = 2820x0,048·(2/22,4) = 12,086 Kg.
Total H en gas = 12,086 + 9,316 + 12,086 = 33,488 Kg.

H en coque = 1,501/42,111 = 0,0356
H en coque = 3,56% del H del carbón (9-6)

H en gas = 33,488/42,111 = 0,7952
H en gas = 79,52% del H del carbón (9-6)

EJERCICIO Nº10 (7)

Un productor de gas utiliza carbón de la siguiente composición:

C	76%
H	3
O	6
H_2O	3
R	12

Es alimentado con una mezcla de aire y vapor.
El gas producido tiene la siguiente composición:

CO	24%	H_2	14%
CH_4	3	N_2	48
C_2H_4	1	H_2O	6
CO_2	4		

1/3 de las cenizas del productor de gas, son carbono que no reaccionó.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producido, por kilogramo de carbón.
2. Los metros cúbicos de aire suministrados, por kilogramo de carbón.
3. Los kilogramos de vapor alimentado, por metro cúbico de aire.
4. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón que está disponible en el gas.

SOLUCION

1.

Vamos a utilizar la ecuación (2):

Cenizas (3/3) = R (2/3) + U.C (1/3) ∴

U.C = 0,12[(1/3) ÷ (2/6)] = 0,06 Kg.

C total en gas = 0,76 – 0,06 = 0,70 Kg.

Cálculo del C que hay en 1 m^3 de gas:

En CO = 1x0,24 = 0,24

En CH_4 = 1x0,03 = 0,03

En C_2H_4 = 2x0,01 = 0,02

En CO_2 = 1x0,04 = 0,04

0,33

C en gas = 0,33·(12/22,4) = 0,177 Kg./m^3 de gas

Gas = 0,70/0,177 = 3,95 m^3

Gas producido = 3,95 m^3/Kg. de carbón (10-1)

2.

N_2 en gas = 3,95x0,48 = 1,896 m^3

Aire = 1,896/0,79 = 2,40 m^3

Aire suministrado = 2,40 m^3/Kg. de carbón (10-2)

3.

H en vapor = H en gas – H en carbón:

Cálculo del H en gas:

En CH_4 = 2x0,03 = 0,06

En C_2H_4 = 2x0,01 = 0,02

En H_2 libre = 1x0,14 = 0,14

En H_2O = 1x0,06 = 0,06

0,28

Total H en gas = 0,28x3,95·(2/22,4) = 0,099 Kg.

H en carbón = 0,03 + 0,03·(2/18) = 0,0333 Kg.

H del vapor = 0,099 – 0,0333 = 0,0657 Kg.

Vapor = 0,0657·(18/2) = 0,5913 Kg.

Vapor = 0,5913/2,40 = 0,245 Kg./m^3 de aire.

Vapor = 0,245 Kg./m^3 de aire (10-3)

4.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)

P.C.B = 8100x0,76 + 34000·(0,03 – 0,06/8) + 0 – 586·(9x0,03 + 0,03) = 6745 Kcal/Kg.

Potencia calorífica del gas:

CH_4 = 0,03x8560 = 257 Kcal.

CO = 0,24x3034 = 728 Kcal.

C_2H_4 = 0,01x14480 = 145 Kcal.

H_2 = 0,14x2582 = 362 Kcal.

P.C.B del gas = 1492 Kcal/m^3

P.C.B del gas = 3,95·(1492/6745) = 0,874 de la del carbón.

P.C.B del gas = 87,4% de la del carbón (10-4)

EJERCICIO N°11 (7)

Un carbón de la siguiente composición, es utilizado en un productor de gas:

C	77,7%	N	1,9%
H	5,4	O	8,7
H_2O	1,8	R	4,5

Las cenizas del productor de gas tienen 25% de carbono sin quemar.
El gas producido tiene la siguiente composición:

CO	22,7%	CO_2	5,2%
H_2	9,6	N_2	57,4
CH_4	2,4	H_2O	1,9
C_2H_4	0,8		

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de gas producido, por libra de carbón.
2. Los pies cúbicos de aire utilizado, por libra de carbón.
3. Las libras de vapor utilizado, por libra de carbón.
4. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón que está disponible en el gas.

SOLUCION

1.
Vamos a utilizar la ecuación (2):
Cenizas (100%) = R (75%) + U.C (25%) $\therefore$
$U.C = 0{,}045\cdot(25/75) = 0{,}015$ lbs.
C total en gas = 0,777 – 0,015 = 0,762 Lbs.

Cálculo del C que hay el 1 ft^3 de gas:
En CO = 1x0,227 = 0,227
En CH_4 = 1x0,024 = 0,024
En C_2H_4 = 2x0,008 = 0,016
En CO_2 = 1x0,052 = <u>0,052</u>
$\sum =$ 0,319
C en gas = 0,319·(12/359) = 0,0106 lbs./ft^3
Gas = 0,762/0,0106 = 71,9 ft^3
Gas producido = 71,9 ft^3/lb. de carbón (11-1)

2.
N_2, aire = N_2, gas – N_2, carbón:
N_2, gas = 71,9x0,574 = 41,27 ft^3
N_2, carbón = 0,019·(359/28) = 0,243 ft^3
N_2, aire = 41,27 – 0,243 = 41,027 ft^3
Aire = 41,027/0,79 = 51,93 ft^3
Aire utilizado = 51,93 ft^3/lb. de carbón. (11-2)

3.
H, vapor = H, gas – H, carbón:

Cálculo del H en gas:

H_2 libre = 1x0,096 = 0,096
CH_4 = 2x0,024 = 0,048
C_2H_4 = 2x0,008 = 0,016
H_2O = 1x0,019 = 0,019
$\Sigma = 0,179$
H en gas = 0,179x71,9·(2/359) = 0,0717 lbs.
H en carbón = 0,054 + 0,018·(2/18) = 0,0561 lbs.
H en vapor = 0,0717 – 0,056 = 0,0157 lbs.
Vapor = 0,0157·(18/2) = 0,1413 lbs.

Vapor = 0,1413 lbs/lb. de carbón (11-3)

4.
Cálculo de la potencia calorífica del carbón:
P.C.B = 14600C + 61000·(H – O/8) + 4000S – 1050·(9H + W)
P.C.B = 14600x0,777 + 61000·(0,054 – 0,087/8) + 0 – 1050·(9x0,054 + 0,018)
= 13446 BTU/lb.

Potencia calorífica del gas:

CO = 0,227x341 = 77 BTU
H_2 = 0,096x290 = 28 BTU
CH_4 = 0,024x962 = 23 BTU
C_2H_4 = 0,008x1627 = 13 BTU
P.C.B del gas = 141 BTU/ft^3
P.C.B del gas = 71,9·(141/13446) = 0,754 de la del carbón.

P.C.B del gas = 75,4% de la del gas. (11-4)

EJERCICIO N°12 (7)

Los siguientes datos fueron obtenidos en la operación de un productor de gas:

CARBON		GAS	
C	75,0%	CO	26,0%
H	4,0	CO_2	3,0
O	6,0	CH_4	2,0
H_2O	5,0	N_2	50,0
R	9,0	H_2	15,0
N	1,0	H_2O	4,0

Las cenizas analizaron 25% de carbono.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producido, por kilogramo de carbón.
2. Los metros cúbicos de aire utilizado.
3. Los kilogramos de vapor suministrados al productor.
4. El porcentaje del vapor total suministrado, que es descompuesto en el productor.

SOLUCION

1.
Utilizamos la ecuación (2):
Cenizas (100%) = R (75%) + U.C (25%) ∴

U.C = 0,09·(25/75) = 0,03 Kg.
C total en gas = 0,75 – 0,03 = 0,72 Kg.

Cálculo del C que hay en 1 m^3 de gas:

En CO = 1x0,26 = 0,26
En CO_2 = 1x0,03 = 0,03
En CH_4 = 1x0,02 = 0,02
$\sum$ = 0,31
C en gas = 0,31·(12/22,4) = 0,166 Kg/m^3 de gas.
Gas = 0,72/0,166 = 4,33 m^3

Gas producido = 4,33 m^3/Kg. de carbón (12-1)

2.
N_2 del aire = N_2 en gas – N_2 en carbón:

N_2 en gas = 4,33x0,5 = 2,165 m^3
N_2 en carbón = 0,01·(22,4/28) = 0,008 m^3
N_2 del aire = 2,165 – 0,008 = 2,157 m^3
Aire = 2,157/0,79 = 2,73 m^3

Aire utilizado = 2,73 m^3/Kg. de carbón (12-2)

3.
H del vapor = H en gas – H del carbón

Cálculo del H en el gas:

CH_4 = 2x0,02 = 0,04 m^3
H_2 libre = 1x0,15 = 0,15 m^3
H_2O = 1x0,04 = 0,04 m^3
$\sum$ = 0,23 m^3/m^3 de gas
Total H_2 = 0,23x4,33 = 0,9959 m^3
Total H en gas = 0,9959·(2/22,4) = 0,0890 Kg.
H del carbón = 0,04 + 0,05·(2/18) = 0,0456 Kg.
H del vapor = 0,0890 – 0,0456 = 0,0434 Kg.
H_2O = 0,0434·(18/2) = 0,391 Kg.

Vapor suministrado = 0,391 Kg./Kg. de carbón (12-3)

4.

H_2O en gas = 0,04x4,33·(18/22,4) = 0,14 Kg.
H_2O no descompuesta = 0,14 – 0,05 = 0,09 Kg.
H_2O descompuesta en quemar C = 0,391 – 0,09 = 0,301 Kg.
H_2O descompuesta = 0,301/0,391 = 0,77 del vapor suministrado

Vapor descompuesto = 77,0% del suministrado (12-4)

EJERCICIO N°13 (7)

Un carbón fue analizado como sigue:

C	84,0%	O	8,0%
H	4,0	R	4,0

Cuando este carbón fue utilizado en un productor de gas, produjo un gas cuyo análisis fue el siguiente:

CO_2	8,0%	H_2	12,0%
CO	20,0	N_2	54,0
CH_4	2,0	H_2O	4,0

Las cenizas totalizaron el 7% del peso del carbón. Asumir que todo el vapor utilizado se descompuso.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de gas producido, por libra de carbón.
2. Los pies cúbicos de aire utilizado, por libra de carbón.
3. Las libras de vapor utilizado, por libra de carbón.
4. El calor absorbido en el productor de gas por el vapor, por libra de carbón.

SOLUCION

1.

Utilizamos la ecuación (2):

Cenizas = R + U.C

U.C = 0,07 – 0,04 = 0,03 lbs.

C total en gas = 0,84 – 0,03 = 0,81 lbs.

Cálculo del C en 1 ft^3 de gas:

En CO_2 = 1x0,08 = 0,08

En CO = 1x0,20 = 0,20

En CH_4 = 1x0,02 = 0,02

Σ = 0,30

C en gas = 0,30·(12/359) = 0,01003 lbs/ft^3 de gas.

Gas = 0,81/0,01003 = 80,8 ft^3

Gas producido = 80,8 ft^3/lb. de carbón (13-1)

2.

N_2 en gas = 80,8x0,54 = 43,632 ft^3

Aire = 43,632/0,79 = 55,2 ft^3

Aire utilizado = 55,2 ft^3/lb. de carbón. (13-2)

3.

H del vapor = H en el gas – H del carbón – H del H_2O del gas.

H del carbón = 0,04 lbs.

H en el gas:

CH_4 = 2x0,02 = 0,04

H_2 libre = 1x0,12 = 0,12

H_2O = 1x0,04 = 0,04

Σ= 0,20

H del gas = 0,20x80,8·(2/359) = 0,09003 lbs.

H del H_2O = 0,04x80,8·(2/359) = 0,018 lbs.

H del vapor = 0,09003 – 0,04 – 0,018 = 0,03203 lbs.

Vapor = 0,03203·(18/2) = 0,288 lbs.

Vapor utilizado = 0,288 lbs/lb. de carbón (13-3)

4.

Ver la Tabla XLII del Apéndice, sobre calores de formación de óxidos:

Calor de formación del H_2O (g) = 57801 lb-cal/mol.

Moles de H_2O = 0,288/18 ∴

Calor de descomposición = 57801·(0,288/18) = 924,8

Calor de descomposición del H_2O = 924,8 lb-cal (13-4)

EJERCICIO N°14 (7)

El mismo carbón del ejercicio # 8 es utilizado en un productor de gas, produciendo gas de la composición siguiente:

CO	24%	CO_2	6%
CH_4	2	H_2	15
H_2O	7	N_2	46

Las cenizas del productor de gas contienen 15% de carbono.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de gas producido, por libra de carbón.
2. La potencia calorífica del carbón, por libra.
3. La potencia calorífica del coque del ejercicio # 8, por libra.
4. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón que se encuentra disponible en el coque.
5. Compare la potencia calorífica del gas del horno para coque, con la del horno productor de gas, cada una por pie cúbico.
6. Compare el valor total del calor disponible en el horno para coque con el del productor de gas, cada uno expresado en porcentaje de la potencia calorífica del carbón a partir del cual fue producido.

SOLUCION

1.

Aplicamos la ecuación (2):

Cenizas (100%) = R (85%) + U.C (15%) ∴

U.C = 0,058·(15/85) = 0,0102 lbs.

C total en gas = 0,766 – 0,0102 = 0,756 lbs.

Cálculo del peso del C en 1 ft^3 de gas:

En CO = 1x0,24 = 0,24

En CO_2 = 1x0,06 = 0,06

En CH_4 = 1x0,02 = 0,02

Σ = 0,32

C = 0,32·(12/359) = 0,0107 lbs./ft^3 de gas.

Gas = 0,756/0,0107 = 70,6 ft^3

Gas = 70,6 ft^3/lb. de carbón (14-1)

2.

P.C.B = 14600C + 61000·(H – O/8) + 4000S – 1050(9H + W)

P.C.B = 14600x0,766 + 61000·(0,051 – 0,072/8) + 4000x0,028 – 1050·(9x0,051 + 0)

= 13376 BTU/lb.

P.C.B del carbón = 13376 BTU/lb. (14-2)

3.

P.C.B = 14600x0,871 + 61000·(0,011 – 0,019/8) + 4000x0,01 – 1050·(0,011 + 0)

= 13179 BTU/lb.

P.C.B del coque = 13179 BTU/lb (14-3)

4.

Coque producido con 2000 lbs. de carbón = 1415 lbs.

P.C.B del coque = (1415x13179) ÷ (2000x13376) = 0,697 de la del carbón.

P.C.B del coque = 69,7% de la del carbón (14-4)

5.

Potencia calorífica del gas de horno para coque:

C_6H_6 = 0,008x3763 = 30 BTU
C_2H_4 = 0,03x1627 = 49 BTU
CH_4 = 0,34x962 = 327 BTU
CO = 0,09x341 = 31 BTU
H_2 = 0,385x290 = 112 BTU
P.C.B gas de coque = 549 BTU/ft^3

P.C.B del gas de horno para coque = 549 BTU/ft^3 (14-5)

Potencia calorífica del gas del productor de gas:

CO = 0,24x341 = 82 BTU
CH_4 = 0,02x962 = 19 BTU
H_2 = 0,15x290 = 44 BTU
P.C.B del gas del productor = 145 BTU/ft^3

P.C.B del gas del productor de gas = 145 BTU/ft^3 (14-5)

La potencia calorífica del gas de horno para coque es mayor que la del productor de gas, por pie cúbico, pero en el productor de gas se produce un volumen mayor de gas.

6.

P.C.B del gas del productor = 70,6·(145/13376) = 0,764 de l del carbón

P.C.B del gas del productor = 76,4% de la del carbón (14-6)

En el horno para coque, se produjeron 11956 ft^3 de gas por 2000 lbs de carbón.

P.C.B del gas de coque = (11956x549) ÷ (2000x13376) = 0,245 de la del carbón.

P.C.B del gas de horno para coque = 24,5% de la del carbón (16-6)

EJERCICIO N°15 (7)

Un horno open-hearth es calentado con gas producido a partir del siguiente carbón:

C	77,0%
H	5,0
O	8,0
H_2O	3,0
R	7,0

Inicialmente, el gas fue producido en un productor de gas, con la siguiente composición:

CO	19,6%	H_2	12,8%
CO_2	7,8	N_2	55,3
CH_4	2,0	H_2O	2,5

Las cenizas del productor de gas contenían 10% de carbono.

Más tarde, el carbón fue destilado en un horno para coque con recuperación de subproductos; produciendo gas de la siguiente composición (tal como sale del horno):

H_2	50,0%	N_2	1,4%
CH_4	28,0	CO_2	2,0
CO	8,0	H_2O	6,6
C_2H_4	4,0		

El coque de estos hornos contenía: C, 89%; H_2O, 1%; R, 10%.

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de coque producido, por 1000 kilogramos de carbón.
2. En cada caso, los metros cúbicos de gas producido; por 1000 kilogramos de carbón.
3. En el productor de gas, los metros cúbicos de aire utilizado, por kilogramo de carbón.
4. En cada caso, la potencia calorífica del gas, por metro cúbico.
5. En cada caso, el porcentaje de la potencia calorífica del carbón que está disponible en el gas.
6. El porcentaje de la potencia calorífica del carbón que está disponible en el coque.
7. Los kilogramos de vapor alimentado al productor, por kilogramo de carbón y el porcentaje de vapor descompuesto en él.

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = Peso de R en carbón ∴

Peso de coque = 1000·(0,07/0,10) = 700 Kg.

Peso de coque = 700 Kg. (15-1)

2.

En ambos casos, utilizamos la ecuación (2):

En el productor de gas:

Cenizas = 1000x0,1 = 100 Kg.

C en cenizas = 100·(0,10 – 0,07) = 30 Kg.

C total en gas = 1000x0,77 – 30 = 740 Kg.

Cálculo del C en 1 m^3 de gas:

En CO = 1x0,196 = 0,196

En CO_2 = 1x0,078 = 0,078

En CH_4 = 1x0,020 = 0,020

$\sum =$ 0,294

C en gas = 0,294·(12/22,4) = 0,1575 Kg./m^3 de gas

Gas = 740/0,1575 = 4700 m^3

Gas producido en el productor de gas = 4700 m^3 (15-2)

En el horno para coque:

C en coque = 700x0,89 = 623 Kg.

C total en gas = 770 – 623 = 147 Kg.

Cálculo del C en 1 m^3 de gas:

En CH_4 = 1x0,28 = 0,28

En CO = 1x0,08 = 0,08

En C_2H_4 = 2x0,04 = 0,08

En CO_2 = 1x0,02 = 0,02

$\sum =$ 0,46

C en gas = 0,46·(12/22,4) = 0,246 Kg./m^3

Gas = 147/0,246 = 597 m^3

Gas producido en el horno para coque = 597 m^3 (15-2)

3.

Por kilogramo de carbón se producen 4,7 m^3 de gas.

N_2 en gas = 4,7x0,553 = 2,6 m^3

Aire = 2,6/0,79 = 3,29 m^3

Aire utilizado en productor de gas = 3,29 m^3/Kg. de carbón (15-3)

4.

Cálculo de la potencia calorífica en el productor de gas:

CO = 0,196x3034 = 595 Kcal.

CH_4 = 0,020x8560 = 171 Kcal

H_2 = 0,128x2582 = 331 Kcal.

$\sum =$ 1097 Kcal

P.C.B del gas del productor = 1097 Kcal/m^3 (15-4)

Cálculo de la potencia calorífica del gas de horno para coque:

H_2 = 0,50x2582 = 1291 Kcal
CH_4 = 0,28x8560 = 2397 Kcal.
CO = 0,08x3034 = 243 Kcal.
C_2H_4 = 0,04x14480 = 579 Kcal.
$\sum$ = 4510 Kcal.

P.C.B del gas de horno para coque = 4510 Kcal./m^3 (15-4)

5.
Cálculo de la potencia calorífica del carbón:
P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)
P.C.B = 8100x0,77 + 34000·(0,05 – 0,08/8) + 0 – 586·(9x0,05 + 0,03)
= 7316 Kcal./Kg. de carbón.
P.C.B del gas del productor = 4,7·(1097/7316) = 0,705 de l a del carbón.
P.C.B del gas del productor = 70,5% de la del carbón (15-5)

P.C.B del gas de horno de coque = 0,597·(4510/7316) = 0,368 de la del carbón.
P.C.B del gas de horno de coque = 36,8% de la del carbón (15-5)

6.
P.C.B del coque = 8100x0,89 –586x0,01 = 7203 Kcal./Kg.
P.C.B del coque = 0,7·(7203/7316) = 0,689 de la del carbón.
P.C.B del coque = 68,9% de la del carbón (15-6)

7.
Gas del productor de gas = 4,7 m^3/Kg. de carbón.
H del vapor = H en gas – H en carbón

Cálculo del H en el gas:

En CH_4 = 4,7x0,02·(4/22,4) = 0,0168 Kg.
En H_2 libre = 4,7x0,128·(2/22,4) = 0,0537 Kg.
En H_2O = 4,7x0,025·(2/22,4) = 0,0105 Kg.
Total H en gas = 0,0810 Kg.

H en carbón = 0,05 Kg.
H del vapor = 0,081 – 0,05 = 0,031 Kg.
H_2O de este = 0,031·(18/2) = 0,279 Kg.
H_2O en carbón = 0,03 Kg.
Vapor alimentado = 0,279 – 0,03 = 0,249 Kg.
Vapor alimentado = 0,249 Kg. (15-7)

Cálculo del % de vapor descompuesto:

H_2O en gas del productor = 4,7x0,025·(18/22,4) = 0,0944 Kg.
H_2O procedente del vapor = (0,0944 – 0,03)·22,4/18 = 0,0801 m^3
Vapor alimentado = 0,249·(22,4/18) = 0,3099 m^3
Vapor descompuesto = 0,3099 – 0,0801 = 0,2298 m^3
Vapor descompuesto = 0,2298/0,3099 = 0,742
Vapor descompuesto = 74,2% (15-7)

EJERCICIO Nº16 (7)

Un carbón utilizado en un productor de gas, analizó lo siguiente:

C	79,0%	N	1,7%
H	5,1	H_2O	1,8
R	6,0	O	6,4

El gas producido tiene la siguiente composición:

CO_2	7,0%	H_2	14,0%
CO	21,0	N_2	53,0
CH_4	2,5	H_2O	2,5

Las cenizas alcanzan al 9,0% del peso del carbón.
El aire utilizado está 80% saturado con vapor de agua.
Temperatura, 26°C; barómetro, 740 mm.

PREGUNTAS

1. El volumen de gas producido, por kilogramo de carbón.
2. El volumen de aire (húmedo) a condiciones normales, utilizado por kilogramo de carbón.
3. El peso del vapor utilizado, por kilogramo de carbón.
4. El porcentaje del agua soplada que fue descompuesta en el productor.
5. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón que está disponible en el gas.

SOLUCION

1.

Utilizando la ecuación (2):

C en cenizas = 0,09 – 0,06 = 0,03 Kg.

C total en gas = 0,79 – 0,03 = 0,76 Kg.

Asumo 1 m^3 de gas.

C en gas = (0,07 + 0,21 + 0,025)·(12/22,4) = 0,1634 Kg./m^3 de gas.

Gas = 0,76/0,1634 = 4,651 m^3

Gas = 4,651 m^3/Kg. de carbón. (16-1)

2.

N_2 en carbón = 0,017·(22,4/28) = 0,0136 m^3

N_2 en gas = 0,53x4,651 = 2,4650 m^3

N_2 para aire seco = 2,4650 – 0,0136 = 2,4514 m^3

Aire seco = 2,4514/0,79 = 3,103 m^3

En la Tabla XXIV del Apéndice, se puede encontrar la presión máxima de saturación del aire con vapor de agua para diferentes temperaturas:

Presión máxima de vapor de agua a 26°C = 25,2 mm.

Presión real del agua = 25,2x0,8 = 20,16 mm.

Presión de aire seco = 740 – 20,16 = 719,84 mm

Volumen de agua = 3,103·(20,16/719,84) = 0,0869 m^3

Aire húmedo = 3,103 + 0,087 = 3,19 m^3

Aire húmedo = 3,19 m^3/Kg. de carbón (16-2)

3.

H libre en carbón = 0,051 Kg.

H_2O en carbón = 0,018 Kg.

H en CH_4 = 4,651x0,025x2·(2/22,4) = 0,0208 Kg.

H libre en gas = 4,651x0,14·(2/22,4) = 0,0581 Kg.

Total H en gas = 0,0789 Kg.

H procedente del vapor = 0,0789 – 0,051 = 0,0279 Kg.

H_2O de este = 0,0279·(18/2) = 0,2511 Kg.

H_2O en gas = 4,651x0,025·(18/22,4) = 0,0934 Kg.

Vapor = 0,2511 + 0,0934 – 0,018 = 0,3265 Kg.

Vapor de agua utilizado = 0,3265 Kg. (16-3)

4.

H_2O descompuesta = 0,2511 Kg.

H_2O del soplo = 0,3265

H_2O descompuesta = 0,2511/0,3265 = 0,769

H_2O descompuesta = 76,9% del soplo. (16-4)

5.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)

P.C.B = 8100x0,79 + 34000·(0,051 – 0,064/8) + 0 –586·(9x0,051 + 0,018)

= 7581,5 Kcal./Kg.

Cálculo de la potencia calorífica del gas:

CO = 4,651x0,21x3034 = 2963,3 Kcal.

CH_4 = 4,651x0,025x8560 = 995,3 Kcal.

H_2 = 4,651x0,14x2582 = 1681,2 Kcal

Potencia calorífica del gas = 5639,8 Kcal.

P.C.B del gas = 5639,8/7581,5 = 0,744 de la del carbón

P.C.B del gas = 74,4% de la del carbón (16-5)

EJERCICIO N°17 (7)

Un productor de gas utiliza un carbón cuyo análisis (seco), es:

C	75,68%	O	12,70%
H	4,50	R	7,12

Tal y como se utiliza, el carbón lleva una humedad igual al 3,4% del carbón seco. Las cenizas del productor contienen 21,07% de carbono sin quemar.

El análisis (seco) del gas producido, es:

CO	5,7%	H_2	10,5%
CO_2	22,0	O_2	0,4
CH_4	2,6	N_2	58,2
C_2H_4	0,6		

En adición, el gas lleva 30,4 gramos de humedad por cada metro cúbico de gas seco.

Ambos, aire y vapor, son suministrados al productor por un soplador. En adición al vapor, el aire lleva 15 gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire seco, debido a la humedad.

PREGUNTAS

1. El volumen de gas seco producido, por kilogramo de carbón.
2. El peso y volumen de aire suministrado, por kilogramo de carbón seco, midiendo el aire en sus condiciones húmedas y a 20°C.
3. El peso del vapor suministrado, por kilogramo de carbón seco.
4. El porcentaje del vapor suministrado que no es descompuesto en el productor.

SOLUCION

1.

Cenizas (100%) = R (78,93%) + U.C (21,07%)

U.C = 0,0712·(21,07/78,93) = 0,0191 Kg.

C total en gas = 0,7568 – 0,0191 = 0,7377 Kg.

Cálculo del C que hay en 1 m^3 de gas:

En $CO = 1x0{,}057 = 0{,}057$
En $CO_2 = 1x0{,}220 = 0{,}220$
En $CH_4 = 1x0{,}026 = 0{,}026$
En $C_2H_4 = 2x0{,}006 = \underline{0{,}012}$
$\sum = 0{,}315$
C en gas $= 0{,}315\cdot(12/22{,}4) = 0{,}169$ Kg./m^3 de gas.
Gas $= 0{,}7377/0{,}169 = 4{,}37\ m^3$

Gas seco producido = 4,37 m^3/Kg. de carbón. (17-1)

2.

N_2 en gas $= 0{,}582x4{,}37 = 2{,}543\ m^3$
Aire seco a C.N $= 2{,}543/0{,}79 = 3{,}22\ m^3$

Cambio de condiciones:

$T_1 = 273K \quad T_2 = 293K$
$V_1 = 3{,}22\ m^3 \quad V_2 = ?$
$V_2 = 3{,}22\cdot(293/273) = 3{,}44\ m^3$ de aire seco a C.D.
Humedad del aire C.N $= 3{,}22\cdot[(15/1000)\cdot(22{,}4/18)] = 0{,}0601\ m^3$
Aire húmedo C.N $= 3{,}22 + 0{,}0601 = 3{,}28\ m^3$
Aire húmedo a C.D $= 3{,}28\cdot(293/273) = 3{,}53\ m^3$

Aire húmedo a C.D = 3,53 m^3/Kg. de carbón (17-2)

Densidad del aire $= 1{,}293$ Kg./m^3
Humedad del aire $= 3{,}22x15/1000 = 0{,}0483$ Kg.
Peso del aire C.N $= 1{,}293x3{,}22 = 4{,}16$ kg.
Peso del aire húmedo $= 4{,}16 + 0{,}0483 = 4{,}21$ Kg.

Peso del aire húmedo = 4,21 Kg./Kg. de carbón (17-2)

3.

H del carbón $= 0{,}045$ Kg.
H_2 en gas $= (2x0{,}026 + 2x0{,}06 + 1x0{,}105)x4{,}37 = 0{,}739\ m^3$
H en gas $= 0{,}739\cdot(2/22{,}4) = 0{,}0659$ Kg.
H en humedad del aire $= 0{,}0483\cdot(2/18) = 0{,}006$ Kg.
H del vapor $= 0{,}0659 + 0{,}006 - 0{,}045 = 0{,}0269$ Kg.
H_2O de este $= 0{,}0269\cdot(18/2) = 0{,}242$ Kg.

Vapor de agua suministrado = 0,242 Kg./Kg. de carbón (17-3)

4.

Vapor no descompuesto = H_2O en gas – Humedad del carbón
H_2O en gas $= 4{,}37x30{,}4/1000 = 0{,}133$ Kg.
H_2O del carbón $= 0{,}034$ Kg.
Vapor no descompuesto $= 0{,}133 - 0{,}034 = 0{,}099$ Kg.
Vapor no descompuesto $= 0{,}099/0{,}242 = 0{,}409$

Vapor no descompuesto = 40,9% (17-4)

EJERCICIO Nº18 (7)

La composición del carbón utilizado y el gas producido en un productor de gas, se dan a continuación:

CARBON		GAS (seco)	
C	76,2%	CO_2	5,9%
H	5,0	CO	22,6
O	10,6	CH_4	2,7
N	1,4	C_2H_4	0,4
H_2O	1,1	H_2	12,6
R	5,7	N_2	55,8

Las cenizas producidas contenían 15,1% de carbono sin quemar.

Del gas fueron removidos 13 granos de vapor de agua, por pie cúbico de aire seco. El aire utilizado llevó 2,2% de vapor de agua.

PREGUNTAS

1. El análisis del gas húmedo.
2. Los pies cúbicos de gas húmedo producido, por libra de carbón.
3. Los pies cúbicos de aire húmedo utilizado.
4. Las libras de vapor utilizado.
5. El porcentaje del vapor inyectado que fue descompuesto en el productor, asumiendo que la humedad del aire se descompuso en el mismo porcentaje que el vapor.

SOLUCION

1.

Cenizas (100%) = R (84,9%) + U.C (15,1%) ∴

U.C = 0,057·(15,1/84,9) = 0,01014 lbs.

C total en gas = 0,762 – 0,010 = 0,752 lbs.

C en gas = (1x0,059 + 1x0,226 + 1x0,027 + 2x0,004)·(12/359) = 0,0107 lbs/ft^3 de gas.

Gas seco = 0,752/0,0107 = 70,28 ft^3

Humedad del gas = 70,28x13 = 913,64 granos

1 grano = 0,000143 lbs.

Humedad = 913,64x0,000143 = 0,131 lbs.

Humedad = 0,131·(359/18) = 2,61 ft^3

Total gas húmedo = 70,28 + 2,61 = 72,89 ft^3

Análisis del gas húmedo (18-1)

CO_2 = 70,28x0,059/72,89 = 5,7%

CO = 70,28x0,226/72,89 = 21,8%

CH_4 = 70,28x0,027/72,89 = 2,6%

C_2H_4 = 70,28x0,004/72,89 = 0,4%

H_2 = 70,28x0,126/72,89 = 12,1%

N_2 = 70,28x0,558/72,89 = 53,8%

H_2O = 2,61/72,89 = 3,6%

2.

Total gas húmedo = 72,89 ft^3 (18-2)

3.

N_2 en carbón = 0,014·(359/28) = 0,18 ft^3

N_2 en gas seco = 0,558x70,28 = 39,17 ft^3

N_2 para aire = 39,17 – 0,18 = 38,99 ft^3

Aire seco = 38,99/0,79 = 49,35 ft^3

Aire húmedo = 49,35/0,978 = 50,4 ft^3

Aire húmedo = 50,4 ft^3 (18-3)

4.

H_2 del carbón = 0,05 + 0,011·(2/18) = 0,05122 lbs.

H en gas seco = 70,28·(2x0,027 + 2x0,004 + 1x0,126)·(2/359) = 0,074 lbs

H del agua del gas = 0,131·(2/18) = 0,0145 lbs.

Total H del gas = 0,074 + 0,0145 = 0,0885 lbs.

Vapor de agua en aire = (50,4 – 49,35) = 1,05 ft^3

H de este = 1,05·(18/359)·(2/18) = 0,00585 lbs.
H del H_2O del carbón = 0,011·(2/18) = 0,00122 lbs.
H del vapor = 0,0885 – 0,0512 – 0,00585 = 0,03145 lbs.
Vapor de agua = 0,03145·(18/2) = 0,283 lbs.
Vapor de agua utilizado = 0,283 lbs.(18-4)

5.

H en gas húmedo = 72,28·(2x0,026 + 2x0,004 + 1x0,121)·(2/359) = 0,0735 lbs.
H_2O de este (descompuesta) = 0,0735·(18/2) = 0,6615 lbs.
H del carbón = 0,05 lbs.
H_2O de este = 0,05·(18/2) = 0,45 lbs.
H_2O en aire = 0,00585·(18/2) = 0,05265 lbs.
Total vapor inyectado = 0,275 + 0,05265 = 0,32765 lbs.
H_2O del vapor descompuesta = 0,6615 – 0,45 = 0,2115 lbs.
Vapor descompuesto = 0,2115/0,32765 = 0,645
Vapor descompuesto = 64,5% del inyectado (18-5)

EJERCICIO N°19 (7)

El carbón siguiente es utilizado en un productor aire-gas, produciendo 4 metros cúbicos de un gas de la composición dada abajo, por kilogramo de carbón.:

CARBON		GAS	
C	75,0%	CO	27,0%
H	3,6	CO_2	3,0
O	6,4	CH_4	2,0
H_2O	6,0	H_2	6,0
R	9,0	N_2	62,0

Los gases dejan el productor a 750°C.

PREGUNTAS

1. El porcentaje de la potencia calorífica del carbón en:
   a) Carbono no combustible en las cenizas
   b) La potencia calorífica del gas.
   c) El calor sensible en el gas
   d) El calor perdido por radiación y conducción.

2. Si el vapor es utilizado para reducir las pérdidas de calor, ¿cuánto vapor sería requerido para reducir el calor perdido en los gases en ¼, y las pérdidas por radiación y conducción en 1/3?.

3. Asumiendo que todas las demás reacciones continúan iguales, cual sería la composición del nuevo gas?

4. ¿Qué porcentaje de la potencia calorífica original del carbón estará presente en el nuevo gas?.

SOLUCION

1.

a.

Potencia calorífica del carbón:
P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)
P.C.B = 8100x0,75 + 34000·(0,036 – 0,064/8) + 0 – 586·(9x0,036 + 0,06) = 6802 Kcal./Kg

Cálculo del C que no reacciona:
C en gas = 4·(1x0,27 + 1x0,03 + 1x0,02)·(12/22,4) = 0,686 Kg.

C que no reacciona = 0,75 – 0,686 = 0,064 Kg.
P.C.B de este = 8100x0,064 = 518,4 Kcal
P.C.B del C que no reacciona = 518,4/6802 = 0,0762
P.C.B del C que no reacciona = 7,62% de la del carbón (19-1.a)

b.
Cálculo de la potencia calorífica del gas.

P.C.B del gas = 4·(0,27x3034 + 0,02x8560 + 0,06x2582) = 4581,2 Kcal.
P.C.B del gas = 4581,2/6802 = 0,673 de la del carbón.
P.C.B del gas = 67,3% de la del carbón (19-1.b)

c.
Con la ayuda de la Tabla XV del Apéndice, calculamos el calor sensible del gas a 750ºC.
Calor sensible = Volumen x Calor específico x Temperatura;

$CO + N_2 = 4x0,89\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}x750)x750 =$ 850,4 Kcal.
$CO_2 = 4x0,03\cdot(0,406 + 9,0x10^{-5}x750)x750 =$ 42,6 Kcal.
$CH_4 = 4x0,02\cdot(0,380 + 21x10^{-5}x750)x750 =$ 32,3 Kcal.
$H_2 = 4x0,06\cdot(0,301 + 2,0x10^{-5}x750)x750 =$ 56,9 Kcal.
Calor sensible en gas = 982,2 Kcal.
Calor sensible en gas = 982,2/6802 = 0,144 del calor del carbón.
Calor sensible en gas = 14,4% de la P.C.B del carbón (19-1.c)

d.
Pérdidas de calor = 6802 – 518,4 – 4581,2 – 982,2 = 720,2 Kacl.
Pérdidas de calor = 720,2/6802 = 0,106 de la P.C.B del carbón.
Pérdidas de calor = 10,6% (19-1.d)

2.
El calor que se ha de perder, puede ser utilizado en descomponer agua y aumentar así la potencia calorífica del gas, por la producción de más gases combustibles, de acuerdo a la siguiente reacción:

$C + H_2O\ (g) = CO + H_2$

De acuerdo a la Tabla XLII del Apéndice:
Calor de formación de H_2O (g) = 57801 Kcal/mol.
Pérdidas reducidas = 982,2·(1/4) + 720,2·(1/3) = 485,6 Kcal.
H_2O = 485,6 Kcal ÷ (57801 Kcal./mol) = 0,0084 moles.
de moles = Peso/Peso molecular ∴
Peso H_2O = 0,0084x18 = 0,151 Kg.
H_2O utilizada para reducir pérdidas = 0,151 Kg. (19-2)

3.
Distribución del C:

La reacción anterior del vapor de agua, necesita:
C = 0,151·(12/18) = 0,101 Kg.
O de esta reacción = 0,151·(16/18)·(22,4/32) = 0,094 m^3
Este supone N_2 = 0,094·(79/21) = 0,354 m^3
N_2 del nuevo gas = 4x0,62 – 0,354 = 2,126 m^3
CO producido = H_2 = 0,151·(22,4/18) = 0,188 m^3
C para CO + CO_2 + CH_4 = 0,686 – 0,101 = 0,585 Kg.

Relación de C en al gas:
En CO = 4x0,27·(12/22,4) = 0,5786 Kg.
En CO_2 = 4x0,03·(12/22,4) = 0,0643 Kg.
En CH_4 = 4x0,02·(12/22,4) = 0,0429 Kg.
Σ= 0,6858 Kg.

$C \rightarrow CO = 0{,}585\cdot(0{,}5786/0{,}6858) = 0{,}494$ Kg.
$C \rightarrow CO_2 = 0{,}585\cdot(0{,}0643/0{,}6858) = 0{,}055$ Kg.
$C \rightarrow CH_4 = 0{,}585\cdot(0{,}0429/0{,}6858) = \underline{0{,}036 \text{ Kg.}}$
0,585 Kg.
CO en nuevo gas = $0{,}494\cdot(22{,}4/12) + 0{,}188 = 1{,}1101$ m^3
CO_2 en nuevo gas = $0{,}055\cdot(22{,}4/12) = 0{,}103$ m^3
CH_4 en nuevo gas = $0{,}036\cdot(22{,}4/12) = 0{,}0672$ m^3

H_2 liberado por $CH_4 = 2X(4x0{,}02 - 0{,}0672) = 0{,}0256$ m^3
H_2 en nuevo gas = $4x0{,}06 + 0{,}188 + 0{,}0256 = 0{,}4536$ m^3

Composición del nuevo gas: (19-3)
N_2 = 2,1260 m^3 = 55,08%
CO = 1,1101 m^3 = 28,76%
CO_2 = 0,1030 m^3 = 2,67%
H_2 = 0,4536 m^3 = 11,75%
CH_4 = 0,0672 m^3 = 1,74%
3,8599 m^3 100,00%

4.
Cálculo de la potencia calorífica del nuevo gas:

CO = 3,8599x0,2876x3034 = 3368 Kcal.
CH_4 = 3,8799x0,0174x8560 = 575 Kcal.
H_2 = 3,8599x0,1175x2582 = 1171 Kcal.
$\sum$ = 5114 Kcal.
P.C.B nuevo gas = 5114/6802 = 0,752

P.C.B nuevo gas = 75,2% de la del carbón (19-4)

Como puede verse, la descomposición del vapor de agua, aumentó la potencia calorífica del gas.

EJERCICIO N°20 (7)

Un productor de gas de agua Dellwick-Fleischer, utiliza el siguiente carbón:

C	64,0%
O	10,9
H	4,7
H_2O	8,6
R	11,8

El productor es operado por alimentación alternativa con solo aire y con solo vapor; produciendo así, alternativamente, gas de aire puro y gas de agua puro-

El 28% del carbón alimentado es quemado durante el ciclo de aire y el 72% durante el ciclo vapor. Despreciar el carbono en las cenizas.

Los análisis de los gases son los siguientes:

GAS DE AIRE		GAS DE AGUA	
CO	9,7%	CO	36,5%
CO_2	33,1	CO_2	1,0
CH_4	1,5	CH_4	2,7
H_2	16,6	H_2	47,0
H_2O	4,1	H_2O	12,8
N_2	35,0		

Asumir que en ambos ciclos el oxígeno del carbón se combina con el carbono, el hidrógeno permanece libre.

PREGUNTAS

1. Por kilogramo de carbón total utilizado, los metros cúbicos de (a) gas de aire y (b) gas de agua producidos.

2. La potencia calorífica de cada uno de los gases, por kilogramo de carbono total, y el porcentaje de la potencia calorífica del carbón, encontrada en el volumen total de cada uno.

3. Los kilogramos de vapor alimentado durante el ciclo vapor, por kilogramo de carbón total quemado durante ambos ciclos.

4. El porcentaje del vapor alimentado que es descompuesto en el productor.

5.
   a. El calor generado por la combustión del carbono a CO y a CO_2, durante el ciclo aire.
   b. El exceso de calor absorbido por la descomposición del vapor sobre el generado por la combustión del carbono durante el ciclo vapor, cada uno expresados por kilogramo de carbón total quemado durante ambos ciclos.

SOLUCION

1.

a. Gas de aire.

C total para gas de aire = 0,64x0,28 = 0,1792 Kg.

Cálculo del C en 1 m^3 de gas:

C = (1x0,097 + 1x0,331 + 1x0,015)·(12/22,4) = 0,237 Kg./m^3 de gas.

Gas de aire = 0,1792/0,237 = 0,756 m^3

Gas de aire = 0,756 m^3/Kg. de carbón total (20-1.a)

b. Gas de agua.

C total para gas de agua = 0,64x0,72 = 0,4608 Kg.

Cálculo del C en 1 m^3 de gas:

C = (1x0,365 + 1x0,010 + 1x0,027)·(12/22,4) = 0,2154 Kg.

Gas de agua = 0,4608/0,2154 = 2,139 m^3

Gas de agua = 2,139 m^3/Kg. de carbón total (20-1.b)

2.

Cálculo de las potencias caloríficas por kilogramo de carbón total

Gas de aire:

P.C.B = 0,097x3034 + 0,015x8560 + 0,166x2582 = 851 Kcal

P.C.B, gas de aire = 851x0,756 = 643 Kcal.

P.C.B, gas de aire = 643 Kcal (20-2)

Gas de agua:

P.C.B = 0,365x3034 + 0,027x8560 + 0,47x2582 = 2552 Kcal.

P.C.B del gas de agua = 2552x2,138 = 5456 Kcal.

P.C.B, gas de agua = 5456 Kcal (20-2)

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)

P.C.B = 8100x0,64 + 34000·(0,047 – 0,109/8) + 0 – 586·(9x0,047 + 0,086)

= 6021 Kcal/Kg.

P.C.B del gas de aire = 643/6021 = 0,107

P.C.B, gas de aire = 10,7% de la del carbón (20-2)

P.C.B del gas de agua = 5456/6021 = 0,907

P.C.B, gas de agua = 90,7% de la del carbón (20.2)

3.

H del carbón = 0,047x0,72 = 0,03384 Kg.
H_2O del carbón = 0,086x0,72 = 0,06192 Kg.
H de esta = 0,06192·(2/18) = 0,00686 Kg.
H total del carbón = 0,03384 + 0,00686 = 0,0407 Kg.

Cálculo del H_2 en gas de agua:
H_2 = 2,138·(2x0,027 + 1x0,47 + 1x0,128) = 1,3940 m^3
H en este = 1,394·(2/22,4) = 0,1246 Kg.
H vapor = 0,1249 – 0,0407 = 0,0839 Kg.
Vapor = 0,0839·(18/2) = 0,755 Kg.
Vapor alimentado, ciclo vapor = 0,755 Kg. (20-3)

4.

H_2O del gas de agua = 0,128x2,138·(18/22,4) = 0,22 Kg.
H_2O del carbón = 0,086x0,72 = 0,062 Kg.
Vapor no descompuesto = 0,22 – 0,062 = 0,158 Kg.
Vapor descompuesto = 0,755 – 0,158 = 0,597 Kg.
Vapor descompuesto = 0,597/0,755 = 0,791
Vapor descompuesto = 79,1% del alimentado (20-4)

5.

a. Calor generado por combustión, ciclo aire:
CO = 0,097x0,756 = 0,0733 m^3
CO_2 = 0,331x0,756 = 0,250 m^3

Cuando C → CO, se generan 2430 Kcal./Kg. de C.
Cuando C → CO_2, se generan 8100 Kcal./Kg. de C.

Calor generado cuando:
C → CO = 0,0733·(12/22,4)x2430 = 95 Kcal.
C → CO_2 = 0,25·(12/22,4)x8100 = 1090 Kcal.
Calor total generado = 95 + 1090 = 1185 Kcal.
Calor generado, ciclo aire = 1185 Kcal. (20-5.a)

b. Ciclo vapor:
Calor de formación del H_2O (g) = 57801 Kcal./mol.
Calor utilizado en descomponer el vapor = 57801·(0,597/18) = 1917 Kcal.
C → CO = 0,365x2,138·(12/22,4) = 0,418 Kg.
C → CO_2 = 0,01x2,138·(12/22,4) = 0,0115 Kg.

Calores de combustión:
C → CO = 0,418x2430 = 1016 Kcal.
C → CO_2 = 0,0115x8100 = 93 Kcal
Calor de combustión = 1109 Kcal.
Calor de exceso = 1917 – 1109 = 808 Kcal.
Calor exceso para descomponer vapor = 808 kcal (20-5.b)

EJERCICIO N°21 (7)

Un productor de gas de agua utiliza coque como combustible, conteniendo 90% de carbono fijo y 10% de residuo.

Cuando estaba en la etapa de vapor, la temperatura de ja cama del combustible promedió 1000°C., y el gas producido contenía (seco):

H_2	50,7%
CO	48,0
CO_2	1,3

Los ensayos demostraron que el 94% del vapor utilizado había sido descompuesto.

Cuando estaba en la etapa de aire (seco), el gas producido fue 21%CO_2 y 79%N_2.

Se produjeron 2,40 metros cúbicos de gas de agua real (húmedo), por kilogramo de coque cargado.

La temperatura del gas de agua caliente y de los productos de combustión calientes al dejar la cama de coque fue de 1000°C.

PREGUNTAS

1. ¿Qué porcentaje de coque fue quemado por vapor, y por aire? (realizar el cálculo sobre la base de un kilogramo de coque utilizado).
2. ¿Qué porcentaje de la potencia calorífica del coque, está representado por la potencia calorífica del gas de agua formado?.
3. ¿Que proporción de la potencia calorífica del coque es sacada como calor sensible en los gases en cada período (de vapor y de aire)?

SOLUCION

1.

C en coque = 0,9 Kg.

En gas de agua:

H_2 en 1 m^3 de gas seco = 0,507 m^3

Vapor de H_2O descompuesto = 0,507 m^3 = 94% del total.

Vapor de agua inyectado/m^3 de gas húmedo = 0,507/0,94 = 0,540 m^3

H_2O en 1 m^3 de gas húmedo = 0,540 – 0,507 = 0,033 m^3

Gas húmedo = 1 + 0,033 = 1,033 m^3/m^3 de gas seco.

1 m^3 de gas seco, equivale a 1,033 m^3 de gas húmedo, entonces, 2,40 m^3 de gas húmedo equivalen a 2,40/1,033 = 2,33 m^3 de gas seco.

C en gas seco = (1x0,48 + 1x0,013)x2,33x(12/22,4) = 0,616 Kg.

Coque en gas de agua = 0,616/0,9 = 0,682

Coque en gas de agua = 68,2% (21-1)

Coque en gas de aire = 100 – 68,2 = 31,8%

Coque en gas de aire = 31,8% (21-1)

2.

P.C.B, coque = 8100x0,9 = 7290 Kcal/Kg.

P.C.B, gas de agua = 2,33x(0,507x2582 + 0,48x3034) = 6445 kcal

P.C.B, gas de agua = 6445/7290 = 0,885 de la del coque

P.C.B, gas de agua = 88,5% de la del coque (21-2)

3.

Etapa de vapor:

Cálculo del calor sensible del gas:

$H_2 = 2{,}33x0{,}507\cdot(0{,}301 + 2{,}0x10^{-5}x1000)x1000 =$ 379 Kcal

$CO = 2{,}33x0{,}48x(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x1000)x1000 =$ 363 Kcal.

$CO_2 = 2{,}33x0{,}013x(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}x1000)x1000 =$ 15 Kcal.

$H_2O = (2{,}40 - 2{,}33)x(0{,}373 + 5{,}0x10^{-5}x1000)x1000 =$ 30 Kcal

Calor sensible en gas = 787 Kcal.

Calor sensible, gas de agua = 787/7290 = 0,108

Calor sensible, gas de agua = 10,8% P.C.B del coque (21-3)

Etapa de aire:

C total gas de aire = 0,9x0,318 = 0,2862 Kg.

C en gas de aire = 0,21·(12/22,4) = 0,113 Kg./m^3 de gas

Gas de aire = 0,286/0,113 = 2,53 m^3

Cálculo del calor sensible del gas de aire:

$CO_2 = 2{,}53x0{,}21x(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}x1000)x1000 =$ 264 Kcal.

$N_2 = 2{,}53x0{,}79x(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x1000)x1000 =$ 648 Kcal.

Calor sensible = 912 Kcal.

Calor sensible, gas de aire = 912/7290 = 0,125

Calor sensible, gas de aire = 12,5% P.C.B dél coque (21-3)

EJERCICIO N°22 (7)

Un productor de gas de agua, utiliza un carbón que contiene 90%C y 10%R. El productor es alimentado con aire solamente durante 7,5 minutos y luego con vapor solamente durante 4 minutos, habiéndose consumido el carbono a la misma rata por minuto, durante cada uno de estos ciclos.

El 2% del carbono se pierde en las cenizas.

El ciclo aire quema la mitad del carbono a CO y la mitad a CO_2, mientras que el ciclo vapor lo quema todo a CO.

Solamente se descomponen los 4/5 del vapor soplado.

PREGUNTAS

1. El volumen de gas de agua producido, por metro cúbico de gas de aire producido.
2. La potencia calorífica, por metro cúbico de gas de aire y de gas de agua.
3. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón, que está disponible en el gas de agua y en el gas de aire.
4. Los metros cúbicos de aire utilizados, por kilogramo de vapor; y los metros cúbicos de aire y los kilogramos de vapor utilizados, por kilogramo de carbón.

SOLUCION

1.

Distribución del C en los diferentes ciclos:

C en cenizas = 0,9x0,02 = 0,018 Kg.

C → gas = 0,9 – 0,018 = 0,882 Kg.

Tiempo total del proceso = 7,5 +4 = 11,5 min.

C → gas de aire = 0,882·(7,5/11,5) = 0,576 Kg.

C → gas de agua = 0,882 – 0,576 = 0,306 Kg.

Cálculo del gas de aire:
Reacciones:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$
$\underline{C + O_2 = CO_2}$
$2C + 1,5O_2 = CO + CO_2$

$O_2 = 0,576[(1,5x22,4) \div (12x2)] = 0,806\ m^3$
$CO = 0,805/1,5 = 0,538\ m^3$
$CO_2 = 0,538\ m^3$
$N_2 = 0,806 \cdot (79/21) = 3,03\ m^3$
Total gas de aire = 3,03 + 0,538 + 0,538 = 4,106 m^3

Cálculo del gas de agua:

$C + H_2O = CO + H_2$
$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$
$CO = 0,306 \cdot (22,4/12) = 0,571\ m^3 = H_2$
O_2 de este = 0,571/2 = 0,2855 m^3
Total O_2 = 0,2855 /(4/5) = 0,357 m^3
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$
$H_2O = 0,357x2 = 0,714\ m^3$
H_2O no descompuesto = 0,714·(1/5) = 0.1428 m^3
Total gas de agua = $CO + H_2 + H_2O$ = 2x0,571 + 0,143 = 1,285 m^3
Gas de agua = 1,285/4.106 = 0,312 m^3/m^3, gas de aire.
Gas de agua = 0,312 m^3/m^3 de gas de aire (22-1)

2.
Gas de aire:

CO = 100·(0,538/4,106) = 13,10%
CO_2 = CO = 13,10%
N_2 = 100 – 13,1x2 = 73,8%
P.C.B, gas de aire = 0,131x3034 = 397 Kcal/m^3
P.C.B, gas de aire = 397 Kcal/m^3 (22-2)

Gas de agua:
P.C.B, gas de agua = P (CO) + P (H_2)
P.C.B, gas de agua = 3034·(0,571/1,285) + 2582·(0,571/1,285) = 2500 Kcal/m^3
P.C.B, gas de agua = 2500 Kcal./m^3 (22-2)

3.

P.C.B, carbón = 8100x0,9 = 7290 Kcal
P.C.B, gas de aire = 397x4,106 = 1630 Kcal.
P.C.B, gas de aire = 1630/7290 = 0,224
P.C.B, gas de aire = 22,4% de la del carbón (22-3)
P.C.B, gas de agua = 2500x1,285 = 3212 Kcal.
P.C.B gas de agua = 3212/7290 = 0,44
P.C.B, gas de agua = 44% de la del carbón (22-3)

4.

Aire utilizado = 0,806/0,21 = 3,84 m^3
Aire utilizado = 3,84 m^3/Kg. de carbón (22-4)

Vapor = 0,714·(18/22,4) = 0,576 Kg.
Vapor = 0,576 Kg./Kg. de carbón (22-4)

Aire utilizado = 3,84/0,576 = 6,66 m^3/Kg. de vapor.
Aire utilizado = 6,66 m^3/Kg. de vapor. (22-4)

EJERCICIO Nº23 (7)

Un carbón contiene:

Materia volátil	25%
Carbono fijo	60
H_2O	3
R	12

La potencia calorífica (baja) de la materia volátil es 9250 Kcal/Kg.

La potencia calorífica del carbono fijo es 8100 Kcal./Kg.

El carbón es utilizado en un productor de gas, en el cual la materia volátil es primero destilada en el gas sin combustión.

La composición del gas producido es la materia volátil + H_2O del carbón + gas de la combustión del carbono fijo (asumir que se quema a CO).

PREGUNTAS

1. El volumen de aire requerido, por kilogramo de carbón utilizado.
2. Si no hay agua en el aire requerido al soplar el productor, ¿cuál es la potencia calorífica del gas, en porcentaje de la potencia calorífica del carbón?.
3. ¿Cuánto vapor (en kilogramos), por kilogramo de carbón utilizado, será necesario para absorber la mitad del calor generado en el productor, despreciando el calor sensible en el vapor?.
4. ¿Cuál sería la potencia calorífica del gas, en porcentaje de la potencia calorífica del carbón cuando es utilizado este vapor?.

SOLUCION

1.

Reacción de combustión:

$$C + ½\,O_2 = CO$$

$O_2 = 0{,}6\cdot(11{,}2/12) = 0{,}56$ Kg.

Aire $= 0{,}56/0{,}21 = 2{,}67\ m^3$

Aire requerido = 2,67 m³/Kg. de carbón (23-1)

2.

Cálculo de la potencia calorífica del gas:

CO = 0,56x2 = 1,12 m^3

P.C.B del gas = CO + materia volátil

CO = 1,12x3034 = 3398 Kcal.

Materia volátil = 9250x0,25 = 2313 Kcal.

P.C.B del gas = 3398 + 2313 = 5711 Kcal.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

P.C.B del carbón = 8100C + 34000·(H –O/8) + 2200S – 586·(9H + W) + Materia volátil

P.C.B del carbón = 8100x0,6 + 0 + 0 – 586x0,03 + 2313 = 7155 Kcal.

P.C.B del gas = 5711/7155 = 0,798 de la del carbón.

P.C.B del gas = 79,8% de la del carbón (23-2)

3.

El vapor quema el C caliente, de acuerdo a la siguiente reacción:

$$C + H_2O = CO + H_2$$

En esta reacción la oxidación del C a CO, por supuesto, genera la misma cantidad de calor que si hubiera sido quemado por aire, pero la descomposición del vapor que lo acompaña absorbe calor. Tal como le muestra la reacción, la descomposición del vapor libera H_2, y esto absorbe una cantidad de calor igual al calor generado cuando el H_2 es quemado a H_2O (g).

Esto se puede ver en la tabla sobre calores de formación (Tabla XLII del Apéndice), y es igual a 28680 Kcal por kilogramo de H_2, equivalente a 3210 Kcal. por kilogramo de vapor o a 57801 Kcal por mol de vapor.; o a 4820 Kcal por kilogramo de C oxidado en la reacción.

Calor generado cuando $C \rightarrow CO = 1{,}12 \cdot (12/22{,}4) x 2430 = 1458$ Kcal.
(El calor generado cuando $C \rightarrow CO = 2430$ Kcal./Kg. de C)
½ calor generado = 1458/2 = 729 Kcal.
vapor = 729 Kcal ÷ 57801 Kcal./mol de vapor = 0,0126 moles de H_2O
1 mol = Peso/Peso molecular ∴
Vapor = 0,0126x18 = 0,2268 Kg.
Vapor = 0,227 Kg./Kg. de carbón (23-3)

4.
$H_2O = 0{,}227 \cdot (22{,}4/18) = 0{,}28 \text{ m}^3 = H_2$
P.C.B del gas = CO + H_2 + Materia volátil.
P.C.B del gas = 3398 + 2313 + 0,28x2582 = 6434 Kcal.
P.C.B del gas = 6434/7155 = 0,899 de la del carbón.
P.C.B del gas = 89,9% de la del carbón (23-4)

EJERCICIO N°24 (7)

Un carbón bituminoso utilizado en un productor de gas contiene:

Humedad	1%	C	78%
Materia volátil	21	H	5
Carbono fijo	70	O	8
R	8	R	8
		H_2O	1

El gas producido, sin utilización de vapor contiene (seco):

CO	35%
CO_2	5
CH_4	5
H_2	5
N_2	50

El gas sale del productor a 500°C.
La potencia calorífica del carbón (práctica o baja), es de 7480 Kcal.

PREGUNTAS

1. El volumen del gas producido, por kilogramo de carbón.
2. La potencia calorífica del gas producido, por metro cúbico.
3. ¿Que proporción del requerimiento 2 es debido a la materia volátil, y que proporción al gas real producido?.
4. ¿Cuánto mayor sería la potencia calorífica del gas para 1 kilogramo de carbón, si se introducen 0,3 kilogramos de vapor por kilogramo de carbón; asumiendo que todo se descompone en el productor?.
5. ¿Cuál sería la composición del gas producido en el requerimiento 4?.

SOLUCION

1.
Para 1 Kilogramo de carbón:
El C del CH_4 se encuentra como materia volátil.

$C \rightarrow CH_4 = 78 - 70 = 8\%$

$CH_4 = 0{,}08 \cdot (22{,}4/12) = 0{,}15$ m³/Kg. de carbón.

Gas húmedo = Gas seco + Humedad

Supongamos 1 m³ de gas seco.

Humedad = $0{,}01 \cdot (22{,}4/18) = 0{,}0124\ m^3$

Gas húmedo = $1 + 0{,}0124 = 1{,}0124\ m^3$

CH_4en el gas húmedo = $0{,}05/1{,}0124 = 0{,}049\ m^3/m^3$ de gas ∴

Gas = 0,15 (m³/Kg. de carbón) ÷ 0,049 (m³/m³ de gas) = 3.061

Gas = 3.061 m³/Kg. de carbón (24-1)

2.

P.C.B del gas = $CO + CH_4 + H_2$

P.C.B del gas = 0,35x3034 + 0,05x8560 + 0,05x2582 = 1619 Kcal

P.C.B del gas producido = 1619 Kcal/m³ (24-2)

3.

La materia volátil contiene CH_4 y H_2, así:

P.C.B de materia volátil = 0,05x8560 + 0,05x2582 = 557,10 Kcal

P.C.B, materia volátil = 557,1/1619 = 0,344 de la del gas

P.C.B, materia volátil = 34,4% de la del gas producido (24-3)

Reacción de gasificación:

$C + H_2O = CO + H_2$

Esta reacción absorbe 3210 Kcal por Kg. de vapor.

Calor consumido = 3210x0,01 = 32,1 Kcal.

La producción de CO genera 0,35x3034 = 1061,9 Kcal.

Calor neto de la reacción = 1061,9 – 32,1 = 1029,8 Kcal.

Calor neto reacción = 1029,8/1619 = 0,636 del gas producido.

Calor neto de reacción = 63,6% del de gas producido (24-3)

4.

La descomposición del vapor se puede interpretar de acuerdo a las reacciones:

1) $H_2O\ (g) = \frac{1}{2}\ O_2 + H_2$

2) $C + H_2O\ (g) = CO + H_2$

En la reacción (1) se absorbe una cantidad de calor igual al calor de formación del vapor de agua (= 57801 Kcal/mol de agua), y esta misma cantidad de calor la reserva el H_2 para aumentar el poder calorífico del gas, así:

Aumento en poder calorífico = $57801 \cdot (0{,}3/18) = 963{,}35$ Kcal.

Pero 1 Kg. de carbón supone 3 m³ de gas, entonces:

Aumento en poder calorífico del gas = 963,35/3 = 321 Kcal./m³

Aumento en poder calorífico del gas = 321 Kcal./m³ (24-4)

5.

Al descomponerse el H_2O tendríamos:

$O_2 = 0{,}3 \cdot (16/18) \cdot (22{,}4/32) = 0{,}187\ m^3$

Este O_2 supone la eliminación de $N_2 = 0{,}187 \cdot (79/21) = 0{,}702\ m^3$

H_2 adicional = $0{,}3 \cdot (22{,}4/18) = 0{,}373\ m^3$

La composición del gas original era:

CO =	0,35 m³ =	34,57%
CO_2 =	0,05 =	4,94
CH_4 =	0,05 =	4,94
H_2 =	0,05 =	4,94
N_2 =	0,50 =	49,39
H_2O =	0,0124 m³ =	1,22%
	1,0214 m³	100,00%

La composición del nuevo gas será: (24-5)

$CO = 3{,}061x0{,}3457 =$	$1{,}058\ m^3 =$	38,85%
$CO_2 = 3{,}061x0{,}0494 =$	$0{,}151 =$	5,54
$CH_4 = 3.061x0{,}0494 =$	$0{,}151 =$	5,54
$H_2 = 3{,}061x0{,}0494 + 0{,}373 =$	$0{,}524 =$	19,23
$N_2 = 3{,}061x0{,}5 - 0{,}702 =$	$0{,}8285 =$	30,40
$H_2O =$	$0{,}0124\ m^3 =$	0,46%
	$2{,}7249\ m^3$	100,00%

EJERCICIO N°25 (7)

Un carbón bituminoso contiene:

C	78%
H	5
O	8
R	9

Cuando es utilizado en un pequeño productor de gas, sin vapor, produjo el siguiente gas (análisis seco):

CO	35%
CO_2	5
CH_4	5
H_2	5
N_2	50

La cantidad de cenizas equivalía al 13% del peso del carbón.

El gas salió del productor a 500°C.

El carbón fue luego utilizado en un productor grande, y se sopló suficiente vapor para reducir las pérdidas de calor como calor sensible en los gases calientes en ¼ y las pérdidas por radiación, convección y conducción en 1/3.

Asumir que los volúmenes de CO_2 y CH_4, y la cantidad de cenizas producidas en este productor fueron los mismos que en el pequeño.

PREGUNTAS

1. El volumen del gas (seco) producido, por kilogramo de carbón, en el productor pequeño.
2. La potencia calorífica de este gas, y el porcentaje de la potencia calorífica del carbón representada en el gas.
3. El número de calorías perdidas en este productor, por kilogramo de carbón:
   a. A través del carbono sin quemar en las cenizas.
   b. Como calor sensible en el gas.
   c. Por radiación, conducción y convección combinadas (por diferencia).
4. Los kilogramos de vapor soplados, por kilogramo de carbón, en el productor grande (asumir todo el vapor descompuesto, y despreciar su contenido de calor sensible).
5. La composición del gas (%) producido en este productor.
6. La potencia calorífica de este gas, por metro cúbico, y el porcentaje de la potencia calorífica del carbón que está disponible en él.

SOLUCION

1.

U.C = Cenizas – R ∴

$U.C = 0{,}13 - 0{,}09 = 0{,}04$ Kg.

C total en gas = $0{,}78 - 0{,}04 = 0{,}74$ Kg.

Cálculo del C en 1 m^3 de gas:

$C = (0{,}35 + 0{,}05 + 0{,}05)\cdot(12/22{,}4) = 0{,}241$ kg./m^3 de gas

Gas = $0{,}74/0{,}241 = 3{,}07\ m^3$

Gas seco = 3,07 m^3/Kg. de carbón (25-1)

2.

Cálculo de la potencia calorífica del gas (ver Tabla L del Apéndice):

$CO = 0{,}35x3034 = 1062$ Kcal.

$CH_4 = 0{,}05x8560 = 428$

$H_2 = 0{,}05x2582 = 129$ Kcal

P.C.B del gas = 1619 Kcal/m^3

P.C.B del gas = 1619 Kcal/m^3 (25-2)

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

$P.C.B = 8100C + 34000\cdot(H - O/8) + 2200S - 586\cdot(9H + W)$

$P.C.B = 8100x0{,}78 + 34000\cdot(9x0{,}05 - 0) + 0 - 586\cdot(9x0{,}05 + 0) = 7414$ Kcal/Kg.

P.C.B del gas = $1619x3{,}07/7414 = 0{,}671$ de la del carbón.

P.C.B del gas = 67,1% de la del carbón (25.2)

3.

a.

P.C.B del U.C = $8100x0{,}04 = 324$ Kcal.

P.C.B del U.C = 324 Kcal./Kg. de carbón (25-3.a)

b.

Cálculo del volumen de los gases:

$CO = 0{,}35x3{,}07 = 1{,}075\ m^3$

$CO_2 = CH_4 = H_2 = 0{,}05x3{,}07 = 0{,}1535\ m^3$

$N_2 = 0{,}5x3{,}07 = 1{,}535\ m^3$

Cálculo del calor sensible del gas (ver tabla XV del Apéndice):

$CO + N_2 = 2{,}61\cdot(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x500)x500 = 408$ Kcal.

$CO_2 = 0{,}1535\cdot(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}x500)x500 = 34$ Kcal.

$CH_4 = 0{,}1535\cdot(0{,}380 + 21{,}0x10^{-5}x500)x500 = 37$ Kcal

$H_2 = 0{,}1535\cdot(0{,}301 + 2{,}0x10^{-5}x500)x500 = 24$ Kcal.

$\Sigma =$ 503 Kcal.

Calor sensible en el gas = 503 Kcal/Kg. de carbón (25-3.b)

c.

Potencia calorífica aprovechable = $7414x0{,}671 = 4975$ Kcal.

Pérdidas por convección, conducción y radiación = $7414 - 4975 - 324 - 503 = 1612$ Kcal.

Pérdidas por convección, radiación y conducción = 1612 Kcal. (25-3.c)

4.

En el productor grande:

El calor de formación del vapor de agua = 3210 Kcal./Kg. de vapor.

Reducción de las pérdidas en los gases = $503\cdot(1/4) = 126$ Kcal

Reducción de las pérdidas por radiación, etc. = $1612\cdot(1/3) = 537$ Kcal

Total calor reducido = $126 + 537 = 663$ Kcal.

Vapor soplado = 663 Kcal ÷ 3210 (Kcal./Kg. de vapor) =0,207 Kg.

Vapor soplado = 0,207 Kg. (25-4)

5.

Reacción de descomposición del vapor de agua:

$$C + H_2O = CO + H_2$$

El volumen inicial de CO no varía en virtud de que el que parte del que se debió producir por el O_2 del aire, lo produce esta reacción; por tanto, el que sí disminuye es el N_2.

H_2 adicional = 0,207·(22,4/18) = 0,2576 m^3

N_2 equivalente = 0,2576·(1/2)x(79/21) = 0,4845 m^3

Composición del gas (25-5)

N_2 = 3,07x0,5 – 0,4845 =	1,0505 m^3	= 36,95%
H_2 = 3,07x0,05 + 0,2576 =	0,4111 m^3	= 14,46%
CO = 3,07x0,35 =	1,0745 m^3	= 37,79%
CO_2 = 3.07x0,05 =	0,1535 m^3	= 5,40%
CH_4 = 3,07x0,05 =	0,1535 m^3	= 5,40%
	2,8431 m^3	100,00%

6.

Cálculo de la potencia calorífica de este gas:

P.C.B del gas = CO + CH_4 + H_2

P.C.B del gas = 0,3779x3034 + 0,0540x8560 + 0,1446x2582 = 1982,15 Kcal/m^3

P.C.B del gas = 1982,15 Kcal/m^3 (25-6)

Potencia calorífica del carbón = 7414 Kcal/Kg.

P.C.B del gas = 1982,15x2,8431/7414 = 0,76 de la del carbón.

P.C.B del gas = 76,0% de la del carbón (25-6)

EJERCICIO N°26 (7)

Un productor de gas utiliza el siguiente carbón:

C	77,5%
H	3,0
O	6,0
H_2O	3,5
R	10.0

Las cenizas del productor de gas tienen 20% de carbono que no reacciona.

El productor fue alimentado con una mezcla de aire y vapor, 4/5 del carbono que reacciona fue quemado por aire y 1/5 por vapor.

Solamente el 80% del vapor soplado se descompuso.

Del carbono quemado por aire, 1/3 pasa a CO_2, el balance pasa a CO.

El oxígeno del carbón se combina con carbono, asumir que todo el hidrógeno del carbón permanece sin combinar.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producido en el productor, por kilogramo de carbón.
2. El porcentaje del calor generado por la combustión del carbono en el productor, que es absorbido por descomposición del vapor.

SOLUCION

1.

Gas = CO_2 + CO + N_2 + H_2 + H_2O

Cenizas (100%) = R (80%) + U.C (20%)

U.C = 0,1·(20/80) = 0,025 Kg.

C total en gas = 0,775 – 0,025 = 0,75 Kg.

La reacción de combustión por aire, se plantea así:

$$2C + O_2 = 2CO$$
$$\underline{C + O_2 = CO_2}$$
$$3C + 2O_2 = 2CO + CO_2$$

C para aire = 0,75·(4/5) = 0,6 Kg.
C para vapor = 0,75 – 0,6 = 0,15 Kg.

Sobre la base de las reacciones:

$O_2 = CO = 0{,}6\cdot(2x22{,}4/3x12) = 0{,}747\ m^3$
$CO_2 = ½\ O_2 = 0{,}747/2 = 0{,}373\ m^3$

Al oxígeno del carbón, vamos a darle el mismo tratamiento que al del aire.

O_2 del carbón = 0,06·(22,4/32) = 0,042 m^3
O_2 del aire = 0,747 – 0,042 = 0,705 m^3
$N_2 = 0{,}705\cdot(79/21) = 2{,}652\ m^3$

Descomposición del vapor:

$$C + H_2O = CO + H_2$$

$CO = H_2 = 0{,}15\cdot(22{,}4/12) = 0{,}28\ m^3 = H_2O$ descompuesta.
H_2O no descompuesta = 0,28·(20/80) = 0,07 m^3
H_2O en gas = 0,07 + 0,035·(22,4/18) = 0,114 m^3
H_2 en gas = 0,28 + 0,03·(22,4/2) = 0,616 m^3
CO en gas = 0,28 + 0,747 = 1,027 m^3
Gas = 0,373 + 2,652 + 0,616 + 1,027 + 0,114 = 4,785 m^3

Gas producido = 4,785 m^3/Kg. de carbón. (26-1)

2.

Calor generado cuando:

$C \rightarrow CO_2 = 0{,}373\cdot(12/22{,}4)x8100 = 1618{,}6$ Kcal.
$C \rightarrow CO = 1{,}027\cdot(12/22{,}4)x2430 = 1337$ Kcal.
Total calor generado por combustión del C = 1618,6 + 1337 = 2955,6 Kcal.
Calor de descomposición del vapor = 0,28x(18/22,4)x3210 = 722,3 Kcal.
Calor de descomposición = 722,3/2955,6 = 0,2444

Calor de descomposición = 24,44% del de combustión (26-2

EJERCICIO N°27 (7)

Un coque de la composición C, 76%; H_2O, 6%; R, 18% es utilizado en un producto de gas, produciendo una mezcla de gases.

La cantidad de vapor es de 1 kilogramo por cada 8 metros cúbicos de aire, pero solamente el 75% de este vapor es descompuesto.

Asumir que el gas no contiene hidrocarburos, y despreciar el carbono en las cenizas.

Del carbono quemado por el aire, ¾ pasa a CO y ¼ a CO_2; todo el carbono consumido por el vapor pasa a CO.

PREGUNTAS

1. Los porcentajes del carbono consumido por el aire y por el vapor.
2. El volumen y composición del gas producido, por kilogramo de coque.

SOLUCION

1.

Vapor descompuesto = 0,75 Kg.
O_2 del aire = 0,21x8 = 1,68 m^3

Reacciones de combustión con aire:

Debido a que 3/4C va a CO y 1/4C a CO_2, la estequiometría de la reacción sería:

$$3C + 1{,}5O_2 = 3CO$$
$$\underline{C + O_2 = CO_2}$$
$$4C + 2{,}5O_2 = 3CO + CO_2$$

C = 1,68x4x12/2,5x22,4 = 1,44 Kg.

Reacción de descomposición del vapor:

$$C + H_2O = CO + H_2$$

C = 0,75(12/18) = 0,5 Kg.
C total oxidado = 1,44 + 0,5 = 1,94 Kg.

C oxidado por aire = 1,44/1,94 = 0,742
C oxidado por aire = 74,2% (27-1)

C oxidado por vapor = 0,5/1,94 = 0,258
C oxidado por vapor = 25,8% (27-1)

2.
Para 1 Kg. de coque:
C para el aire = 0,76x0,742 = 0,564 Kg.
C para el vapor = 0,76 – 0,564 = 0,196 Kg.

Gases producidos en la reacción con aire:
O_2 del aire = 0,564x2,5x22,4/4x12 = 0,66 m^3
N_2 de este = 0,66·(79/21) = 2,47 m^3
CO = 0,66·(3/2,5) = 0,79 m^3
CO_2 = 0,66/2,5 = 0,263 m^3

Gases producidos en la reacción con el vapor:
CO = H_2 = H_2O descompuesto = 0,196·(22,4/12) = 0,366 m^3
H_2O no descompuesto = 0,366·(25/75) = 0,122 m^3
H_2O del coque = 0,06·(22,4/18) = 0,0746 m^3

Volumen y composición del gas (27-2)

CO = 0,79 + 0,366 =	1,1560 m^3 =	25,97%
CO_2 =	0,2630 m^3 =	5,91%
N_2 =	2,4700 m^3 =	55,48%
H_2 =	0,3660 m^3 =	8,22%
H_2O = 0,122 + 0,0746 =	0,1966 m^3	4,42%
	4,4516 m^3	100,00%

EJERCICIO N°28 (7)

El productor de gas de la New Jersey Zinc Company en Palmerton, Pa., quema carbón antracita, la composición del cual es aproximadamente la siguiente:

C	88%
H_2O	3
R	9

Los productores son alimentados con una mezcla de aire y vapor con teniendo 1/7 de vapor en volumen. 90% del vapor es descompuesto en el productor, formando CO e hidrógeno.

El aire forma CO y CO_2 en la proporción de 4:1. Las cenizas del productor contienen 12% de carbono sin quemar (U.C).

PREGUNTAS

1. El volumen y composición en porcentaje del gas producido, por kilogramo de carbón.

2. La cantidad de calor economizado por el uso del vapor, y la proporción de la potencia calorífica del gas representada por esta cantidad.

SOLUCION

1.

C en cenizas = 0,09·(12/88) = 0,0123 Kg.
C oxidado = 0,88 – 0,0123 = 0,8677 ≈ 0,87 Kg.

Si tomamos 1 m^3 de mezcla:

Aire = 6/7 = 0,857 m^3
Vapor = 1 – 0,857 = 0,143 m^3
O_2 del aire = 0,857x0,21 = 0,18 m^3

Reacciones con el aire:
Dado que la proporción $CO:CO_2 = 4:1$, el balance de la reacción con aire quedaría:

$$4C + 2O_2 = 4CO$$
$$C + O_2 = CO_2$$
$$5C + 3O_2 = 4CO + CO_2$$

C = 0,18x5x12/3x22,4 = 0,161 Kg./m^3 de mezcla.

Reacción con vapor:

$$C + H_2O = CO + H_2$$

Vapor descompuesto = 0,143x0,9 = 0,1287 m^3
C de este = 0,1287·(12/22,4) = 0,0689 Kg./m^3 de mezcla
C total = 0,161 + 0,0689 = 0,2299 Kg./m^3 de mezcla.
%C para aire = 0,161/0,2299 = 70,03%
%C para el vapor = 100 – 70,03 = 29,97%
C para aire = 0,8677x0,7003 = 0,608 Kg.
C para vapor = 0,8677 – 0,608 = 0,2597 Kg.

Cálculo del volumen de los gases producidos con aire:

O_2 del aire = 0,608x3x22,4/5x12 = 0,681 m^3
CO por aire = 0,681·(4/3) = 0,910 m^3
CO_2 por aire = 0,681/3 = 0,227 m^3
N_2 = 0,681·(79/21) = 2,57 m^3

Cálculo del volumen de los gases producidos con vapor:

CO por vapor = 0,2597·(22,4/12) = 0,484 m^3 = H_2 = H_2O
H_2O no descompuesta = 0,484·(10/90) = 0,054 m^3
H_2O del carbón = 0,03·(22,4/18) = 0,037 m^3

Volumen y composición del gas producido (28-1)

CO = 0,910 + 0,484 =	1,394 m^3 =	29,3%
CO_2 =	0,227 m^3 =	4,8%
N_2 =	2,570 m^3 =	53,9%
H_2 =	0,484 m^3 =	10,2%
H_2O = 0,540 + 0,037 =	0,091 m^3 =	1,9%
	4,766 m^3	100,0%

2.
El calor de descomposición del vapor de agua = 57801 Kcal/mol.
Vapor descompuesto = 0,484·(18/22,4) = 0,389 Kg.
Calor economizado = 57801·(0,389/18) = 1250 Kcal.
Este calor es el aporte del H_2 a la potencia calorífica del gas
= 0,484x2582 = 1250 Kcal.
Calor economizado por el uso del vapor = 1250 Kcal. (28.2)

P.C.B del gas = CO + H_2
P.C.B del gas = 3034x1,394 + 2582x0,484 = 5479 Kcal.
Calor economizado = 1250/5479 = 0,229
Calor economizado = 22,9% de la P.C.B del gas (28-2)

EJERCICIO N°29 (7)

El siguiente carbón fue utilizado en un productor de gas:

C	75%	S	3%
H	4	H_2O	5
O	6	R	7

Las cenizas pesaron el 10% del peso del carbón.
Por kilogramo de carbón se utilizaron 3,1 metros cúbicos de aire, asumido seco.
Del carbono que entra al productor de gas, 2/3 pasan a CO, ¼ a CO_2 y 1/12 pasan a CH_4.
Asumir que todo el CO_2 en el gas resulta de la reacción con el aire, nada se forma por la reacción con vapor.
El hidrógeno del carbón no se oxida, el oxígeno del carbón forma CO y CO_2.
Parte del aire se utiliza en quemar todo el azufre a SO_2.

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de vapor utilizados, por kilogramo de carbón.
2. Los metros cúbicos de gas producidos, por kilogramo de carbón.
3. El porcentaje de la potencia calorífica del carbón que está representado en el gas.

SOLUCION

1.
Las reacciones del proceso son:

$$S + O_2 = SO_2$$
$$C + O_2 = CO_2$$
$$2C + O_2 = 2CO$$
$$C + 2H_2 = CH_4$$
$$C + H_2O = CO + H_2$$

Cenizas = R + U.C ∴
U.C = 0,1 – 0,07 = 0,03 Kg.
C que reacciona = 0,75 – 0,03 = 0,72 Kg.
C → CO = 0,72·(2/3) = 0,48 Kg.
C → CO_2 = 0,72·(1/4) = 0,18 Kg.
C → CH_4 = 0,72·(1/12) = 0,06 Kg.

Peso del aire = 3,1x1,293 = 4,0083 Kg.
O del aire = 4,0083x0,232 = 0,93 Kg.
O del S = 0,03·(32/32) = 0,03 Kg.
O del aire a CO y CO_2 = 0,93 – 0,03 = 0,90 Kg.

O total a CO = 0,48·(16/12) = 0,64 Kg.
O total a CO_2 = 0,18·(32/12) = 0,48 Kg.
Total O a CO y CO_2 = 0,64 + 0,48 = 1,12 Kg.
O del vapor = 1,12 – 0,06 – 0,9 = 0,16 Kg.
Vapor = 0,16·(18/16) = 0,18 Kg.

Vapor = 0,18 Kg./Kg. de carbón (29-1)

2.

Gas = CO + CO_2 + CH_4 + N_2 + SO_2 + H_2

CO = 0,48·(22,4/12) = 0,896 m^3
CO_2 = 0,18·(22,4/12) = 0,336 m^3
CH_4 = 0,06·(22,4/12) = 0,112 m^3
N_2 = 3,1x0,79 = 2,449 m^3
SO_2 = 0,03·(22,4/32) = 0,021 m^3
H_2 = 0,04·(22,4/2) + 0,18·(22,4/18) – 2x0,112 = 0,448 m^3

Gas = 0,896 + 0,336 + 0,112 + 2,449 + 0,021 + 0,448 = 4,262 m^3

Gas producido = 4,262 m^3/Kg. de carbón (29-2)

3.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)
P.C.B = 8100x0,75 + 34000·0,04 – 0,06/8) + 2200x0,03 – 586(9x0,04 + 0,05)
= 7005,7 Kcal./Kg.

Cálculo de la potencia calorífica del gas:

P.C.B del gas = CO + CH_4 + H_2
P.C.B del gas = 0,896x3034 + 0,112x8560 + 0,448x2582 = 4833,9 Kcal.
P.C.B del gas = 4833,9/7005,7 = 0,69

P.C.B del gas = 69% de la del carbón (29-3)

EJERCICIO N°30 (7)

Un productor de gas utiliza carbón del siguiente contenido:

C	75%	O	6%
H	4	H_2O	6
R	9		

Este productor es suministrado con aire y vapor en la relación de 7 metros cúbicos de aire por cada kilogramo de vapor.

Asumir que la humedad del carbón se evapora y aparece como vapor de agua en el gas producido.

El 80% del vapor suministrado se descompone y el 20% pasa al gas como vapor de agua.

El 90% del carbono que es quemado por el aire pasa a CO y el 10% a CO_2.

Asumir que el oxígeno del carbón reacciona con el carbono y forma CO y CO_2 en la misma relación que el oxígeno del aire.

Todo el carbono quemado por el vapor pasa a CO.

El 5% del carbono del carbón forma CH_4 y el 2% se pierde en las cenizas.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producidos, por kilogramo de carbón.
2. La composición del gas producido.
3. El porcentaje del carbono total que es quemado por el aire y por el vapor.
4. El porcentaje de la potencia calorífica del carbón, que está presente en el gas.

SOLUCION

1.

Cálculo del carbono para combustión:

C total = 0,75 Kg.

$C \rightarrow CH_4 = 0,75x0,5 = 0,0375$ Kg.

C en cenizas = 0,75x0,02 = 0,015 Kg.

C para combustión = 0,75 – 0,0375 – 0,015 = 0,6975 Kg.

Reacciones:

$C + O_2 = CO_2$

$2C + O_2 = 2CO$

$C + H_2O = CO + H_2$

$C + 2H_2 = CH_4$

Distribución del C para combustión:

Sea X = C consumido por el aire.

$O \rightarrow CO = 0,9X \cdot (32/24) = 1,2X$ Kg.

$O \rightarrow CO_2 = 0,1X \cdot (32/12) = 0,27X$ Kg.

Cálculo del C consumido por el oxígeno del carbón:

$1,2X + 0,27X = 0,06 \therefore$

X = 0'06/1,47 = 0,041 Kg.

C consumido por el O del carbón = 0,041 Kg.

C(vapor + aire) = 0,698 – 0,041 = 0,657 Kg.

De acuerdo a la proporción aire-vapor propuesta:

O_2 del aire = 7x0,21 = 1,47 m^3

Densidad del aire = 1,293

Peso del aire = 7x1,293 = 9,051 Kg.

Peso del O del aire = 9,051x0,232 = 2,1 Kg.

C asumido al aire = 2,1/1,47 = 1,43 Kg.

C asumido al vapor = 0,8·(12/18) = 0,53 Kg.

C asumido (aire + vapor) = 1,43 + 0,53 = 1,96 Kg.

Distribución real del C (vapor + aire):

C para aire = 0,657·(1,43/1,96) = 0,479 Kg.

C para vapor = 0,657·(0,53/1,96) = 0,178 Kg.

Destino de estos carbonos:

En aire:

$C \rightarrow CO = 0,479x0,9 = 0,4311$ Kg.

$C \rightarrow CO_2 = 0,479x0,1 = 0,0479$ Kg.

En el O del combustible:

$C \rightarrow CO = 0,041x0,9 = 0,0369$ Kg.

$C \rightarrow CO_2 = 0,41x0,1 = 0,0041$ Kg.

En vapor:

$C \rightarrow CO = 0,178$ Kg.

Total C para combustión = 0,4311 + 0,0479 + 0,0369 + 0,0041 + 0,178 = 0,698 Kg.

Cálculo del aire utilizado

Por reacciones:

O_2 del CO_2 = 0,0479·(22,4/12) = 0,089 m^3

O_2 del CO = 0,4311·(22,4/2x12) = 0,402 m^3

Total O_2 del aire = 0,089 + 0,402 = 0,491 m^3

Aire = 0,491/0,21 = 2.338 m^3

Cálculo del vapor cargado:

Vapor = 2,338/7 = 0,334 Kg.
Vapor cargado = 0,334·(22,4/18) = 0,416 m^3
Vapor descompuesto = 0,416x0,8 = 0,333 m^3
Vapor no descompuesto = 0,416x0,2 = 0,083 m^3

CO del O_2 del carbón = 0,0369·(22,4/2x12) = 0,034 m^3
CO_2 " " = 0,0041·(22,4/12) = 0,008 m^3

Cálculo del gas formado:
Gas formado = $CO + CO_2 + N_2 + H_2 + H_2O + CH_4$

CO = 2x0,402 + 2x0,034 + 0,333 =	1,205 m^3
CO_2 = 0,089 + 0,008 =	0,097 m^3
N_2 = 2,338x0,79 =	1,847 m^3
H_2 = 0,04·(22,4/2) + 0,333 – 2x0,053 =	0,675 m^3
H_2O = 0,083 + 0,06·(22,4/18) =	0,158 m^3
CH_4 = 0,0375·(22,4/16) =	0,053 m^3
Total gas =	4,030 m^3

Total gas formado = 4,030 m^3/Kg. de carbón (30-1)

2.

Sobre la base del cálculo de los volúmenes de c/u de las especies que componen la mezcla gaseosa en el punto anterior, tendremos:

Composición del gas producido (30-2)

CO = 29,9%
CO_2 = 2,4%
N_2 = 45,8%
H_2 = 16,7%
H_2O = 3,9%
CH_3 = 1,3%

3.

C total = 0,75 Kg.

C quemado por aire = 0,479 Kg.
C quemado por aire = 0,479/0,75 = 0,639
C quemado por aire = 63,9% del C total (30-3)

C quemado por vapor = 0,178 Kg.
C quemado por vapor = 0,178/0,75 = 0,237
C quemado por vapor = 23,7% del C total (30-3)

4.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:
P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)
P.C.B = 8100x0,75 + 34000·(0,04 – 0,06/8) + 0 – 586·(9x0,04 + 0,06)
= 6934 Kcal/Kg.

P.C.B del gas = $CO + H_2 + CH_4$
P.C.B del gas = 1,205x3034 + 0,675x2582 + 0,053x8560 = 5853 Kcal.

P.C.B del gas = 5853/6934 = 0,844
P.C.B del gas = 84,4% de la del carbón (30-4)

EJERCICIO N°31 (7)

Un productor de gas es alimentado con una mezcla de 1,2 kilogramos de vapor de agua por cada 10 kilogramos de aire. Solamente son descompuestos 5/6 del vapor.

Del carbono quemado por el aire, ¼ pasa a CO_2; todo el carbono quemado por el vapor pasa a CO.

Por cada kilogramo de carbón, en la parte superior del productor se destila lo siguiente:

CH_4 = 0,07 Kg.	H = 0,02 Kg.
C_2H_4 = 0,06	CO = 0,03
C_6H_6 = 0,04	H_2O = 0,03

El carbón remanente contiene 0,65 kilogramos de carbono y 0,10 kilogramos de residuos.

Las cenizas del productor contienen 25% de carbono sin quemar.

PREGUNTAS

1. El porcentaje del carbono fijo que es:
   a. Perdido en las cenizas.
   b. Quemado por el aire.
   c. Quemado por el vapor.
2. El volumen del gas producido, por kilogramo de carbón.
3. La composición (%) del gas en volumen.
4. La cantidad de calor economizado por el uso del vapor, por kilogramo de carbón.

SOLUCION

1.

Reacciones de combustión:

$$C + O_2 = CO_2$$
$$2C + O_2 = 2CO$$
$$C + H_2O = CO + H_2$$

Cálculo del C que se quema:

Cenizas (100%) = R (75%) + U.C (25%) ∴

U:C = 0,1·(25/75) = 0,033 Kg.

C quemado = 0,65 – 0,033 = 0,617 Kg.

Sobre la base de la relación cargada de aire y vapor:

O del aire = 10x0,232 = 2,32 Kg.

Este O pasa a CO y a CO_2

Vapor descompuesto = 1,2·(5/6) = 1,0 Kg.

Cálculo del C consumido por el aire:

Sea X = C quemado por el aire.

O del CO_2 del aire = (1/4)·X·(32/12) = 0,667X Kg.

O del CO del aire = (3/4)·X·(32/24) = 1.0X Kg.

0,667X + X = 2,32 Kg. ∴

X = 1,392 Kg. = C quemado por el aire.

C quemado por vapor = 1·(12/18) = 0,667 Kg.

Distribución del C entre vapor y aire:

1,392 + 0,667 = 2,059

C para aire = 0,617·(1,392/2,059) = 0,417 Kg.

C para vapor = 0,617·(0,667/2,059) = 0,200 Kg.

C perdido en cenizas = 0,033/0,65 = 0,051

C perdido en cenizas = 5,1% del total (31-1.a)

C quemado por aire = 0,417/0,65 = 0,642

C quemado por aire = 64,2% del total (31-1.b)

C quemado por vapor = 0,2/0,65 = 0,307

C quemado por vapor = 30,7% del total (31-1.c)

2.

Gas = $CO_2 + CO + H_2 + H_2O + N_2 + CH_4 + C_2H_4 + C_6H_6$

Distribución del C del aire:

$C \rightarrow CO_2 = 0,417 \cdot (1/4) = 0,104$ Kg.

$C \rightarrow CO = 0,417 \cdot (3/4) = 0,313$ Kg.

Cálculo del gas:

CO_2 del aire = $0,104 \cdot (22,4/12) = 0,194\ m^3$

CO del aire = $0,313 \cdot (11,2/12) = 0,584\ m^3$
CO del vapor = $0,2 \cdot (22,4/12) = 0,373\ m^3$
CO volátil = $0,03 \cdot (22,4/28) = 0,024\ m^3$
Total CO = $0,584 + 0,373 + 0,024 = 0,981\ m^3$

H_2 volátil = $0,02 \cdot (22,4/2) = 0,224\ m^3$
H_2 del vapor = $0,373\ m^3$
H_2 total = $0,224 + 0,373 = 0,597\ m^3$

Vapor descompuesto = $0,2 \cdot (18/12) = 0,3$ Kg. = 83,3% del cargado.
Vapor no descompuesto = $0,3 \cdot (16,7/83,3) = 0,06$ Kg.
Vapor no descompuesto = $0,06 \cdot (22,4/18) = 0,075\ m^3$
H_2O volátil = $0,03 \cdot (22,4/18) = 0,037\ m^3$
Total H_2O en gas = $0,075 + 0,037 = 0,112\ m^3$

Total vapor cargado = $0,3 + 0,06 = 0,36$ Kg.
Aire cargado = $0,36 \cdot (10/1,2) = 3,0$ Kg.
Aire = $3/1,293 = 2,32\ m^3$
$N_2 = 2,32 x 0,79 = 1,833\ m^3$

$CH_4 = 0,07 \cdot (22,4/16) = 0,098\ m^3$
$C_2H_4 = 0,06 \cdot (22,4/28) = 0,048\ m^3$
$C_6H_6 = 0,04 \cdot (22,4/78) = 0,011\ m^3$

Total gas = $0,194 + 0,981 + 0,597 + 0,112 + 1,833 + 0,098 + 0,048 + 0,011 = 3,874\ m^3$

Gas producido = 3,874 m³ (31-2)

3.

Sobre la base de los volúmenes determinados en el punto anterior para c/u de los componentes de la mezcla gaseosa:

Composición del gas (31-3)

CO_2	5,0%	CO	25,3%
H_2	15,4	H_2O	2,9
N_2	47,3	CH_4	2,5
C_2H_4	1,2	C_6H_6	0,3

4.

El calor ahorrado es el aporte del H_2 a la potencia calorífica del gas:

Calor ahorrado = 0,373x2582 = 963 Kcal.

Calor ahorrado = 963 Kcal./Kg. de carbón (31-4)

EJERCICIO N°32 (7)

Un productor de gas Mond es alimentado con una mezcla de aire y vapor, utilizando 2,5 Kg. de vapor por cada kilogramo de carbón consumido.

La composición del carbón es la siguiente:

C	62,7%	N	1,4%
O	10,9	H_2O	8,6
H	4,6	R	11,8

Las cenizas equivalen al 15,5% del peso del carbón.

Asumir que todo el nitrógeno del carbón, aparece en el gas como NH_3. 5% del carbono del carbón pasa al gas como CH_4.

Asumir que todo el oxígeno del carbón se combina con el carbono, ½ del carbono pasa a CO y ½ a CO_2.

Todo el carbono quemado por el aire y por el vapor también pasa la mitad a CO y la mitad a CO_2.

Del vapor soplado, solamente el 20% se descompone.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire utilizado, por kilogramo de carbón.
2. El volumen del gas producido, por kilogramo de carbón.
3. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón que está disponible en el gas producido (excluyendo el NH_3).

SOLUCION

1.

Cálculo del C que se quema:

$U.C = Cenizas - R \therefore$

$U.C = 0,155 - 0,118 = 0,037$ Kg.

$C \rightarrow CH_4 = 0,627x0,05 = 0,03125$ Kg.

C que se quema $= 0,627 - 0,037 - 0,03125 = 0,559$ Kg.

Distribución del C que hace combustión:

$C \rightarrow CO = 0,559/2 = 0,2795$ Kg.

$C \rightarrow CO_2 = 0,2795$ Kg.

Cálculo del O del aire:

O del CO $= 0,2795\cdot(16/12) = 0,373$ Kg.

O del $CO_2 = 0,2795\cdot(32/12) = 0,745$ Kg.

Total O para CO y $CO_2 = 0,373 + 0,745 = 1,118$ Kg.

Vapor descompuesto $= 2,5x0,2 = 0,5$ Kg.

O de este $= 0,5\cdot(16/18) = 0,444$ Kg.

O del carbón $= 0,109$ Kg.

O del aire $= 1,118 - 0,444 - 0,109 = 0,565$ Kg.

Aire $= 0,565/0,232 = 2,435$ Kg.

Aire $= 2,435/1,293 = 1,883\ m^3$

Aire = 1,883 m^3/Kg. de carbón (32-1)

2.

Gas $= CO_2 + CO + N_2 + H_2 + NH_3 + CH_4 + H_2O$.

Reacciones:

1) $C + O_2 = CO_2$
2) $2C + O_2 = 2CO$
3) $C + H_2O = CO + H_2$
4) $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$
5) $N_2 + 3\ O_2 = 2NH_3$
6) $C + 2H_2 = CH_4$

Cálculo del volumen de los gases, excluyendo el H_2

$CO_2 = 0{,}2795\cdot(22{,}4/12) = 0{,}522\ m^3$
$CO = 0{,}2795\cdot(22{,}4/12) = 0{,}522\ m^3$
$NH_3 = 0{,}014\cdot(22{,}4/14) = 0{,}022\ m^3$
$N_2 = 1{,}883x0{,}79 = 1{,}488\ m^3$
$CH_4 = 0{,}03125\cdot(22{,}4/12) = 0{,}058\ m^3$
$H_2O = (0{,}086 + 2)\cdot(22.4/18) = 2{,}596\ m^3$

Cálculo del H_2:
Distribución del C combustible:
Sea X = C a combinarse con O del carbón.

O del CO = (1/2)x(32/24)X = 0,667X
O del CO_2 = (1/2)x(32/12)X = 1,333X
0,667X + 1,333X = 0,109 Kg. ∴
X = 0,0545 Kg.
$C \rightarrow CO = C \rightarrow CO_2 = 0{,}0545/2 = 0{,}02725$ Kg.
CO de este = $CO_2 = 0{,}02725\cdot(22{,}4/12) = 0{,}051\ m^3$

Cálculo del C y gases del aire:
De acuerdo al análisis anterior, 2X es la cantidad de C a combinarse con el O del carbón y/o también con su equivalente de aire, por tanto:

2X = 0,565 ∴
X = 0,2825 Kg.
$C \rightarrow CO = C \rightarrow CO_2 = 0{,}2825/2 = 0{,}14125$ Kg.
$CO = CO_2$ del aire $= 0{,}14125\cdot(22{,}4/12) = 0{,}264\ m^3$

Para el H_2O:

C para H_2O = 0,559 – 0,0545 – 0,2825 = 0,222 Kg.
$C \rightarrow CO = C \rightarrow CO_2 = 0{,}222/2 = 0{,}111$ Kg.

Reacción (3):

$CO = H_2 = 0{,}111\cdot(22{,}4/12) = 0{,}2072\ m^3$

Reacción (4):

$CO_2 = 0{,}111\cdot(22{,}4/12) = 0{,}2072\ m^3$
$H_2 = 0{,}2072x2 = 0{,}4144\ m^3$

Reacción (5):

$NH_3 = 0{,}014\cdot(22{,}4/14) = 0{,}022\ m^3$
$H_2 = 0{,}022x1{,}5 = 0{,}033\ m^3$
H_2 del carbón $= 0{,}046\cdot(22{,}4/2) = 0{,}515\ m^3$

Reacción (6):

$CH_4 = 0{,}03125\cdot(22{,}4/12) = 0{,}058\ m^3$
$H_2 = 2x0{,}058 = 0{,}116\ m^3$
H_2 total $= 0{,}2072 + 0{,}4144 + 0{,}515 + 0{,}033 + 0{,}116 = 0{,}987\ m^3$
Gas $= 0{,}522 + 0{,}522 + 1{,}488 + 0{,}987 + 0{,}022 + 0{,}058 + 2{,}596 = 6{,}195\ m^3$

Volumen del gas = 6,195 m^3/Kg. de carbón (32-2)

3.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586·(9H + W)
P.C.B = 8100x0,627 + 34000·(0,046 – 0,109/8) + 0 – 586·(9x0,046 + 0,086)
= 5886 Kcal.

Cálculo de la potencia calorífica del gas:

P.C.B del gas = $CO + H_2 + CH_4$

P.C.B del gas = 0,522x3034 + 0,987x2582 + 0,058x8560 = 4628,5 Kcal.

P.C.B del gas = 4628,5/5886 = 0,786

P.C.B del gas = 78,6% de la del carbón (32-3)

EJERCICIO N°33 (9)

Un gas combustible ($CO + H_2$), es producido pasando continuamente oxígeno y vapor de agua a través de un reactor que contiene una cama de coque fluidizada (supóngase C puro).

El coque y el oxígeno se introducen a 77°F; el vapor a baja presión, entra a unos 212°F.

El reactor se mantiene a 1850°F controlando la proporción vapor/oxígeno, y el gas para la combustión deja el reactor a 1850°F.

Supóngase que no hay pérdidas de calor del reactor a los alrededores.

Supóngase que se completan las reacciones de manera que el gas consiste enteramente de H_2 y CO.

PREGUNTAS

1. Calcular la proporción en peso del vapor al oxígeno para la operación, bajo las condiciones descritas.
2. ¿Cuál será el análisis del gas para la combustión?.

SOLUCION

1.

Reacciones de gasificación:

1) $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$
2) $C + H_2O = CO + H_2$

Sea X = peso del oxígeno ∴

X/32 = 0,03125 X lb-mol de O.

Sea Y = Peso del vapor de agua ∴

Y/18 = 0,056Y lb-mol de H_2O.

Cálculo del contenido de calor del vapor de agua al entrar al reactor:
Tomando como referencia 77°F, el contenido de calor a una temperatura "t" será:

$H_t - H_{77}$ = BTU/lb-mol.

Calor con que entra el vapor de agua = 212°F.
Debemos pues calcular para el agua:
$H_{212} - H_{77}$, Para esto, recurrimos a tablas que se encuentran en (9), e interpolamos así:

Para t = 200°F, $H_t - H_{77}$ = 1000 BTU/lb-mol

Para t = 400°F, $H_t - H_{77}$ = 2640 BTU/lb-mol

Interpolando encontramos $H_{212} - H_{77}$ = 1908,4 BTU/lb-mol.

Calor aportado por el vapor de agua = 1908,4·(Y/18) = 61,02Y BTU.

Cálculo de los calores de reacción:

En (1): CO = (28/16)X·(1/28) = 0,0625X lb-mol.

En (2): CO = (28/18)Y·(1/28) = 0,056Y lb-mol

Las tablas (9) traen los calores de formación a 77°F:

CO = -29,6x1800 = - 53800 BTU/lb-mol.

H_2O = - 57,8x1800 = - 104040 BTU/lb-mol.

Calor de reacción en (1) = - 53800x0,0625X = - 3362, 5X BTU
Calor de reacción en (2) = 0,056Y·(-53800 + 104040) = 2813,44Y BTU

Contenido de calor en los gases a 1850°F.
Por interpolación:

Para el $H_2 = H_{1850} - H_{77}$ = 12650 BTU/lb-mol
Para el $CO = H_{1850} - H_{77}$ = 13450 "
Calor total en CO = 13450·(0,0625X + 0,056Y) = 640,625X + 753,2Y BTU
H_2 = (2/18)·(1/2)Y = 0,056 lb-mol.
Calor en H_2 = 12650x0,056Y = 708,4Y BTU.
Calor total en gas = 708,4Y + 753,2Y + 840,625X = 1461,6Y + 840,625X

Para que se mantenga el reactor a 1850°F, debemos igualar el calor que entra con el que sale:

- 3362,5X + 2813,44Y – 61,02Y = 1461,6Y + 840,625X ∴
1290,82Y = 4203,125X ∴
Relación vapor/O = Y/X = 4203,125/1290,82 = 3,256:1

Vapor:O = 3,256:1 (33-1)

2.
Supongamos ahora que el vapor = 1000 lbs.

O = 1000/3,256 = 307,13 Lbs.
CO total = 307,13·(359/16) + 1000·(359/18) = 26836 ft^3
H_2 = 1000·(359/18) = 19944 ft^3

Análisis del gas (33-2)

CO =	26836 ft^3 =	57,37%
H_2 =	19944 ft^3 =	42,63%
	46780 ft^3	100,00%

EJERCICIO Nº34 (9)

PREGUNTAS

1. ¿Cuál es la composición del gas de aire ideal, producido por gasificación de carbono puro con aire seco; para obtener una mezcla que solo contenga N_2 y CO?.

2. ¿Qué porcentaje del poder calorífico del carbono original se encuentra representado en el poder calorífico del gas de aire?. Dar cuenta del resto del poder calorífico.

SOLUCION

1.
Reacción del gas de aire:

$$C + ½ O_2 = CO$$

Supongamos 100 lbs de C:

O_2 = 100x0,5x359/12 = 1495,83 ft^3

Composición del gas de aire ideal (34-1)

CO = 1495,83x2 =	2991,67 ft^3 =	34,71%
N_2 = 1495,83·(79/21) =	5627,18 ft^3 =	65,29%
Gas de aire ideal =	8618,85 ft^3	100,00%

2.

Poder calorífico del C = 14600x100 = 1'460.000 BTU
Poder calorífico del gas = 1991,67x341 = 1.020.160 BTU
Poder calorífico del gas = 1'020.160/1'460.000 = 0,6987

Poder calorífico del gas = 69,87% del de C (34-2)

El resto del poder calorífico del C (=30,13%) representa pérdidas en el horno y el calor arrastrado por el CO y el diluyente N_2.

EJERCICIO N°35 (9)

El análisis de un gas pobre es el siguiente:

N_2	50%	CO	25%
H_2	18	CO_2	6
O_2	1		

PREGUNTAS

1. Calcular el poder calorífico neto, BTU/ft^3 (seco a C.N).
2. El poder calorífico neto, Kcal./m^3 (seco a C.N).
3. El poder calorífico bruto, BTU/ft^3 (60°F, 30 in-Hg; saturado).

SOLUCION

1.

Para este cálculo, ver la Tabla L del Apéndice:

Para 1 ft^3

P.C.B del gas = CO + H_2

P.C.B del gas = 0,25x341 + 0,18x290 = 137,45 BTU/ft^3

P.C.B del gas = 137,45 BTU/ft^3 (35-1)

2.

Para 1 m^3

P.C.B del gas = 0,25x3034 + 0,18x2582 = 1233,26 Kcal/m^3

P.C.B del gas = 1233,26 Kcal./m^3 (35-2)

3.

T = 60°F = 15,6°C

P = 30 in-Hg = 762 mm-Hg.

Ver Tabla XXIV del Apéndice:

Presión de saturación del agua a 15,6°C = 0,52 in = 13,21 mm-Hg.

H_2O = 100·(13,21/762) = 1,73%

Gas seco = 100 – 1,73 = 98,27%

Cambio de composición del gas:

N_2 = 0,5x98,27 = 49,135%

CO = 0,25x98,27 = 24,568%

H_2 = 0,18x98,27 = 17,689%

CO_2 = 0,06x98,27 = 5,896%

O_2 = 0,01x98,27 = 0,983%

En la Tabla L se advierte que para obtener la potencia calorífica bruta (P.C.A) de los gases, se adiciona 471 Kcal./m^3 o 53 BTU/ft^3 por cada mol de H_2 en el gas.

Dado que la composición el volumen es molar también, tendríamos 0,17689 moles de H_2.

P.C.A = 0,17689·(290 + 53) + 0,24568x341 = 144,45 BTU/ft^3

P.C.A = 144,45 BTU/ft^3 (35-3)

EJERCICIO N°36 (9)

PREGUNTAS

1. ¿Qué porcentaje del poder calorífico del carbono está representado en el gas de agua ideal (50%CO, 50%H_2), producido por gasificación de carbono puro?. Explicar el hecho de que el valor térmico total del gas es mayor que el del carbono original.

SOLUCION

1.

Reacción del gas de agua:

$$C + H_2O = CO + H_2$$

Asumimos 100 Kg. de C puro.

$$H_2 = CO = 100\cdot(22{,}4/12) = 186{,}67\ m^3$$

P.C.B del C = 100x8100 = 810000 Kcal.

P.C.B del gas = 186,67x(3034 + 2582) = 1'048.339 Kcal.

P.C.B del gas = 1´048.339/810000 = 0,12942

P.C.B del gas = 129,42% del de C (36-1)

El valor térmico del gas de agua ideal excede el del carbono original, por el hecho de que esta reacción es endotérmica para poder descomponer el agua y todo el calor de exceso lo absorben los productos de combustión (H_2 y CO) que son combustibles y no contienen diluyentes.

EJERCICIO N°37 (9)

Un gas pobre ideal producido por carbono puro, aire y agua; podría caracterizarse de la manera siguiente:

a) Las reacciones de gasificación se completan, por lo que el gas pobre consiste únicamente de N_2, H_2 y CO.

b) Los materiales de entrada y los de salida no contienen calor sensible (esto es, todos están a 77°F), y

c) El proceso es adiabático.

Para este proceso ideal:

PREGUNTAS

1. Calcular la proporción del vapor, libras por libra de carbono.
2. Calcular el gas producido, en pies cúbicos (C.N) por libra de carbono.
3. La composición del gas.
4. El poder calorífico del gas, BTU/ft^3. Comparar estos resultados con los datos para gasógenos comerciales y gases pobres.

SOLUCION

1.

Reacciones de gasificación para la producción del gas pobre:

a. $C + O_2 = CO_2$

b. $CO_2 + C = 2CO$

c. $\underline{C + H_2O = H_2 + CO}$

d. $3C + O_2 + H_2O = H_2 + 3CO$

Partiendo de 1 libra de C:

Vapor de H_2O = 1x(18/3x12) = 0,5 lbs.

Vapor de H_2O = 0,5 lbs./lb. de C (37-1)

2.

Sobre la base de la reacción (d):

O_2 = 1·(359/3x12) = 9,972 ft^3

Gas pobre producido a C.N/lb. de C (37.2)

N_2 = 9,972·(79/21) =	37,514 ft^3 =	48,47%
CO = 9,972x3 =	29,916 ft^3 =	38,65%
H_2 = 9,972x1 =	9,972 ft^3	12,88%
	77,402 ft^3	100,00%

3.

La composición del gas es: (37-3)

N_2 = 48,47%
CO = 38,65%
H_2 = 12,88%
100,00%

4.

P.C.B del gas = CO + H_2
P.C.B del gas = 0,3865x341 + 0,1288x290 = 169,15 BTU/ft^3
P.C.B del gas = 169,15 BTU/ft^3 (37-4)

El calor total sería:
P.C.B del gas = 169,15x77,402 = 13092,43 ft^3.

Para gasógenos comerciales (9), pag. 114:
Proporción de vapor = 0,2 a 1 lb/lb de C
Producción de gas = 55 a 88 ft^3/lb de C
Dado que en nuestro caso la proporción de vapor es 0,5 lb/lb deC, podemos sacar un promedio para el gasógeno comercial:
Producción de gas = (55 + 88)/2 = 71,5 ft^3/lb de C ∴
P.C.B , gasógeno = 169,15x71,5 = 12094,23 BTU, menor que la ideal.

EJERCICIO N°38 (9)

PREGUNTAS

Repetir los cálculos del ejercicio # 37 para un gasógeno ideal alimentado con carbono puro, oxígeno y vapor.

SOLUCION

1.

La reacción (d) del ejercicio anterior sigue siendo la misma, solo que esta vez no se alimenta aire, sino oxígeno puro y por tanto en el gas no habrá N_2.

Para 1 libra de C:

Vapor = 1x18/3x12 = 0,5

Vapor = 0,5 lbs./lb. de C (38-1)

2.

Sobre la base de la reacción (d):

$H_2 = 9{,}972\ ft^3$

$CO = 29{,}916\ ft^3$

Gas producido = 9,972 + 29,916 = 39,888 ft^3

Gas producido a C.N = 39,888 ft^3/lb. de C (38-2)

3.

Composición del gas (38-3)

$CO = 29{,}916\ ft^3 = 75\%$

$H_2 = \underline{9{,}972\ ft^3} = \underline{25\%}$

$39{,}888\ ft^3 \quad 100\%$

4.

P.C.B del gas = 0,75x341 + 0,25x290 = 328,25 BTU/ft^3

P.C.B del gas = 328,25 BTU/ft^3 (38-4)

Como el promedio del gas producido por libra de C fue calculado en 71,5 ft^3 para el gasógeno comercial, se puede observar que es casi el doble del producido en este caso, 39,888 ft^3, pero la potencia calorífica es mucho mayor cuando de utiliza oxígeno puro, por no contener gases diluyentes.

CAPITULO VI

TERMOQUIMICA Y TERMOFISICA

EJERCICIO N°1 (7)

PREGUNTAS

Calcular el calor de reacción para cada una de las reacciones que se mencionan a continuación (colocar el signo apropiado, más o menos, antes de cada valor; para el CO y CO_2 utilizar los valores para carbono amorfo):

1. $2FeS + 3O_2 = 2FeO + 2SO_2$
2. $4Fe_2O_3 + 9C = 8Fe + 6CO + 3CO_2$
3. $ZnO + C = Zn + CO$
4. a) $PbS + 2PbO = 3Pb + SO_2$
   b) $PbS + PbSO_4 = 2Pb + 2SO_2$
   c) $2PbS + 2PbO + PbSO_4 = 5Pb + 3SO_2$

5. a) $4FeS_2 + 11\ O_2 = 2Fe_2O_3 + 8SO_2$
   b) $4\ CuFeS_2 + 13\ O_2 = 4CuO + 2Fe_2O_3 + 8SO_2$

SOLUCION

El *calor de reacción* es el calor desarrollado (producido) o absorbido durante una reacción química, y puede ser calculado a partir de los *calores de formación* de los compuestos involucrados en la reacción (7).

En termodinámica se acostumbra a pensar en términos del contenido de energía del sistema original. El calor desarrollado en una reacción representa un *decrecimiento* en la energía poseída por el sistema original (reactivos), por tanto, el calor desarrollado lleva signo negativo.

El cambio en el contenido de energía o cambio de entalpía de un sistema, representado por el calor desarrollado o absorbido, se representa por el símbolo ΔH.

Cuando el calor es desarrollado o producido (reacción exotérmica), ΔH es negativo; cuando el calor es absorbido por el sistema (reacción endotérmica), ΔH es positivo.

En una reacción química debe cumplirse:

$$\Delta H = \sum \Delta H \text{ productos} - \sum \Delta \text{H reactivos} \qquad (1)$$

El ΔH para los productos o los reactivos representa el calor de formación de los respectivos compuestos y para el estudio des las reacciones propuestas, estos valores se encuentran en las tablas XLII, XLVII y XLVI del Apéndice. Para los elementos puros, este valor se toma como cero.

1.

$$2FeS + 3O_2 = 2FeO + 2SO_2$$

Calores de formación:

$FeS =$ - 23100 Kcal/mol
$FeO =$ - 64300 "
$SO_2(g) =$ - 70940 "
$O_2 = 0$

Aplicando la ecuación (1):

$$\Delta H = -2x70940 - 2x64300 - (-2x23100) = -224280 \text{ Kcal}$$

Calor de reacción = - 224280 Kcal (1-1)

2.

$$4Fe_2O_3 + 9C = 8Fe + 6CO + 3CO_2$$

Calores de formación:

Fe_2O_3 = - 198500 Kcal/mol.
Con C amorfo:
CO = - 29100 "
CO_2 = - 97200 "

Aplicando la ecuación (1)

ΔH = - 3x97200 – 6x29160 + 4x198500 = + 327440 Kcal.

Calor de reacción = + 327440 Kcal (1-2)

3.

$$ZnO + C = Zn + CO$$

Calor de formación del ZnO = - 83500 Kcal/mol

ΔH = - 29160 + 83500 = + 54500 Kcal.

Calor de reacción = + 54500 Kcal (1-3)

4.

Calores de formación:

PbS = - 22200 Kcal./mol
PbO = - 52500 "
SO_2 = - 70940 "
$PbSO_4$ = - 218500 "

a): $PbS + 2PbO = 2Pb + SO_2$

ΔH = - 70040 + 2x52500 + 22200 = + 56260 Kcal.

Calor de reacción = + 56260 kcal (1-4.a)

b): $PbS + PbSO_4 = 2\ Pb + 2\ SO_2$

ΔH = - 2x70940 + 218500 + 22200 = + 98820 Kcal

Calor de reacción = + 98820 Kcal. (1-4.b)

c): $2\ PbS + 2\ PbO + PbSO_4 = 5\ Pb + 3\ SO_2$

ΔH = - 3x70940 + 2x22200 + 2x52500 + 218500 = + 155080 Kcal

Como esta reacción es el resultado de sumar (a) + (b), el calor de reacción también se obtiene de la misma manera:

$\Delta H(c) = \Delta H(a) + \Delta H(b)$

$\Delta H(c)$ = 56260 + 98820 = 155080 Kcal.

Calor de reacción = 155080 Kcal (1-4.c)

5.

Calores de formación:

FeS_2 = - 35500 Kcal./mol
CuO = - 38500 "
$CuFeS_2$ = - 40130 "

a): $4FeS_2 + 11\ O_2 = 2\ Fe_2O_3 + 8\ SO_2$

ΔH = - 8x70940 – 2x198500 + 4x35500 = - 822520 Kcal.

Calor de reacción = - 822520 Kcal.(1-5.a)

b): $4CuFeS_2 + 13\ O_2 = 4\ CuO + 2Fe_2O_3 + 8SO_2$

$\Delta H = -\ 8x70940 - 2x198500 - 4x38500 + 4x40130 = -\ 958000$ Kcal.

Calor de reacción = - 958000 Kcal (1-5.b)

EJERCICIO N°2 (7)

PREGUNTAS

1. Con el uso de las tablas de Apéndice, obtener los siguientes calores de formación: (Fe, Si, O_3), (FeO, SiO_2) y (Si, O_2).
2. Escribir cada una en la forma de una ecuación química.
3. A partir de estas ecuaciones, determinar el calor de formación del FeO, por kilogramo de Fe.

SOLUCION

1.

La Tabla XLIV (A.) del Apéndice presenta:

(Fe, Si, O_3): $\Delta H = -\ 273500$ Kcal/mol. (a partir de sus elementos)

Calor de formación = - 273500 Kcal./mol (2-1)

La Tabla XLIV (B.) del Apéndice presenta:

(FeO, SiO_2): $\Delta H = -\ 8200$ Kcal/mol. (a partir de los óxidos constituyentes)

Calor de formación = - 8200 Kcal/mol (2-1)

La Tabla XLII del Apéndice presenta:

(Si, O_2): $\Delta H = -\ 201000$ Kcal./mol. (a partir de sus elementos)

Calor de formación = - 201000 Kcal./mol (2-1)

2.

En la forma de ecuaciones termodinámicas tendríamos (2-2)

$Fe + Si + 3\ O = FeSiO_3$: $\Delta H = -\ 273500$ Kcal./mil
$FeO + SiO_2 = FeSiO_3$: $\Delta H = -\ 8200$ Kcal./mol
$Si + O_2 = SiO_2$: $\Delta H = -\ 201000$ Kcal./mol.

3.

Es necesario advertir que cuando se invierte el sentido de una reacción, el calor involucrado en ella cambia de signo, por lo tanto, para encontrar el calor de formación del FeO a partir de sus elementos; vamos a escribir las reacciones anteriores de la siguiente manera:

$Fe + \cancel{Si} + 3\ O = \cancel{FeSiO_3}$: $\Delta H = -\ 293500$ Kcal./mol
$\cancel{FeSiO_3} = FeO + \cancel{SiO_2}$: $\Delta H = +\ 8200$ "
$\cancel{SiO_2} = \cancel{Si} + O_2$: $\Delta H = +\ 201000$ "
$Fe + O = FeO$: $\Delta H = -\ 64300$ Kcal/mol

Calor de formación del FeO = - 64300 Kcal./mol. (2-3)

Los compuestos similares que se encuentran en igual cantidad pero en lados opuestos del signo igual se cancelan, hasta obtener una reacción final.

El calor de formación será la suma aritmética de los correspondientes a cada reacción.

Si se observa la Tabla XLII del Apéndice, se puede ver que el valor calculado para el Feo coincide con el tabulado.

EJERCICIO Nº3 (7)

PREGUNTAS

1. Dados los siguientes calores de formación encontrados en las tablas del Apéndice, calcular el calor de oxidación de la plata a Ag_2O, por kilogramo de plata:

(Ag_2O, N_2O_5): $\Delta H = -46100$ Kcal./mol.
(Ag, N, O_3): $\Delta H = -29400$ "
(N_2, O_5): $\Delta H = +600$ "

2. dados los siguientes calores de reacción (- ΔH):
MnO a partir de Mn y O: 1757 lb-cal. por libra de Mn.
SO_3 a partir de S y 3 O: 2930 lb.-cal. Por libra de S.
$MnSO_4$ a partir de Mn, S y 4 O: 1664 lb. cal. Por libra de $MnSO_4$.

Calcular el calor de formación molar del $MnSO_4$, a partir de MnO y SO_3.

SOLUCION

1.
Vamos a ordenar los datos de que disponemos en términos de reacciones termodinámicas:

a) $Ag_2O + N_2O_5 = 2AgNO_3$: $\Delta H = -46100$
b) $Ag + N + O_3 = AgNO_3$: $\Delta H = -29400$
c) $N_2 + O_5 = N_2O_5$: $\Delta H = +600$

Si invertimos el sentido de las reacciones (a) y (c), y multiplicamos la (b) por 2, tendremos:

a) $\cancel{2AgNO_3} = Ag_2O + \cancel{N_2O_5}$: $\Delta H = +46100$
b) $2Ag + \cancel{2N} + 2\ O_3 = \cancel{2AgNO_3}$: $\Delta H = 2x(-29400)$
c) $\cancel{N_2O_5} = \cancel{N_2} + 5\ O$: $\Delta H = -600$

Sumando algebraicamente: $2Ag + O = Ag_2O$

$\Delta H = +46100 - 2x29400 - 600 = -13300$ Kcal.

Peso atómico de la plata = 107,9

$\Delta H = 13300/2x107,9 = 61,6$ Kcal./Kg. de Ag.

ΔH = 61,6 Kcal./Kg. de Ag. (3-1)

2.
Ordenamiento de los datos termodinamicamente:

a) $Mn + O = MnO$: $\Delta H = -1757$ lb-cal/lb. de Mn.
b) $S + 3\ O = SO_3$: $\Delta H = -2930$ lb.-cal./lb. de S
c) $Mn + S + 4\ O = MnSO_4$: $\Delta H = -1664$ lb-cal/lb de $MnSO_4$

Organizamos las reacciones para obtener lo requerido:

a) $MnO = \cancel{Mn} + \cancel{O}$: $\Delta H = +1757$
b) $SO_3 = \cancel{S} + \cancel{3\ O}$: $\Delta H = +2930$
c) $\cancel{Mn} + \cancel{S} + \cancel{4\ O} = MnSO_4$: $\Delta H = -1664$
d) $MnO + SO_3 = MnSO_4$

La reacción (d) es el resultado de la cancelación de términos similares en lados opuestos del signo de igualdad, para después sumar los que no se pudieron cancelar, colocándolos en su misma posición respecto de este signo.

Pesos atómicos: S = 32; Mn = 55.
Pesos moleculares: $MnSO_4$ = 151

$\Delta H = \sum \Delta H$, productos - $\sum \Delta H$, reactivos:

$$\Delta H = (-1664x151 - 1757x55 - 2930x32)/151 = 2925$$

Calor de formación = 2925 lb-cal/mol de $MnSO_4$ (3-2)

EJERCICIO N°4 (7)

PREGUNTAS

1. Un mineral de antimonio que contiene 27% de Sb_2S_3 es tostado, produciendo Sb_2O_3 y SO_2. El peso del mineral tratado es de 5000 libras.

Se requiere:

a) El volumen de aire requerido, en pies cúbicos.
b) La cantidad de calor desarrollado, en libras-calorías.

2. Un horno eléctrico es utilizado para manufacturar bisulfuro de carbono gaseoso, a través de la reacción del carbono con el azufre. La producción es de 7 toneladas métricas en 24 horas.

Se requiere:

a) La cantidad total de energía desarrollada o requerida (cual?) en la reacción, en kilocalorías.
b) La potencia o energía en kilovatios.

SOLUCION

1.

a):

Pesos atómicos: Sb = 121,8; S = 32; O = 16
Pesos moleculares: Sb_2S_3 = 339,6; Sb_2O_3 = 291,6; SO_2 = 64.

Reacción de tostación:

$$Sb_2S_3 + 4,5\ O_2 \rightarrow Sb_2O_3 + 3SO_2$$

Sb_2S_3 = 5000x0,27 = 1350 lbs.
O_2 = 2350·(4,5x359/339,6) = 6422 ft^3

Oxígeno requerido = 6422 ft^3 (4-1.a)

b):

Las tablas XLII y XLVII del Apéndice, presentan los siguientes datos para los calores de formación:

Sb_2S_3: ΔH = - 36000 lbs-cal/lb-mol.
SO_2: ΔH = - 70940 "
Sb_2O_3: ΔH = - 165800 "

Cálculo de los pesos:

SO_2 = 1350·(3x64/339,6) = 763,25 lbs.
Sb_2O_3 = 1350·(291,6/339,6) = 1159,19 lbs.

Dado que el calor de formación viene expresado en: lbs-cal/peso fórmula (= lbs-cal/lb-mol), para calcular el calor evolucionado en la reacción se procede así:

$$\Delta H = \Delta H, SO_2 + \Delta H, Sb_2O_3 - \Delta H, Sb_2S_3$$

$$\Delta H = -70940 \cdot (763,25/64) - 165800 \cdot (1159,19/291,6) + 36000 \cdot (1350/339,6) = 1'362.006$$

ΔH = 1'362.006 lbs-cal (4-1.b)

2.

a):

Peso molecular: $CS_2 = 76$

Calor de formación del $CS_2(g) = + 22000$ Kcal../mol.

Reacción:

$C + S_2 = CS_2(g)$: $\Delta H = + 22000$ Kcal./mol.

$$\Delta H = 22000\cdot(7000/76) = 2'026.315,8 \text{ Kcal.}$$

Como ΔH tiene signo (+), quiere decir que la reacción es endotérmica, es decir, requiere calor para llevarse a cabo.

Calor total = + 2'026.316 Kcal., requerido (4-2.a)

b):

1 Kcal. = 0,001163 Kw-hr.

El calor total encontrado en el numeral anterior, se refiere a 24 horas de operación.

Energía = 2'026315,8(Kcal/24hr)x(0,001163 Kw-hr/1 Kcal) = 98,2 Kw

Energía = 98,2 Kw (4-2.b)

EJERCICIO Nº5 (7)

Un horno eléctrico es alimentado con CaO y C, en las proporciones adecuadas para producir CaC_2, de acuerdo a la reacción:

$$CaO + 3C = CO + CaC_2$$

Se producen 0,25 kilogramos de CaC_2 por kilovatio-hora. El CaC_2 reacciona con agua de acuerdo a la siguiente reacción:

$$CaC_2 + 2H_2O = Ca(OH)_2 + C_2H_2$$

PREGUNTAS

1. La energía mínima requerida para producir una tonelada de CaC_2 por hora.
2. La eficiencia energética electrotérmica para la operación del horno.
3. Si 100 gramos de CaC_2 se trataran con 10 kilogramos de agua, cuantas calorías serían liberadas, y cuantos grados de elevación de temperatura resultarían?.

SOLUCION

1.

Calores de formación:

CaC_2: $\Delta H = - 14600$ Kcal./mol.
CO: $\Delta H = - 29100$ "
CaO: $\Delta H = - 151600$ "

Cálculo del número de moles:

CaC_2 = 1000 Kg. = 1000/64 = 15,625 moles.
CaO = 1000·(56/64) = 875 Kg. = 15,625 moles.
CO = 1000·(28/64) = 437,5 Kg. = 15,625 moles.

$$\Delta H = 15,625\cdot(- 14600 - 29160 + 151600) = 1'685.500 \text{ Kcal./hr}$$

1 Kw = 860 Kcal./hr.

Energía = 1'985.000·(Kcal/hr)x(Kw/860 Kcal/hr) = 1959,3 Kw

Energía mínima requerida = 1959,3 Kw (5-1)

2.

Si se utiliza 1 Kw-hr para producir 0,25 Kg. de CaC_2, la energía total para producir 100 Kg./hr será:

Energía total = 1000/0,25 = 4000 Kw.
Eficiencia = 1959,3/4000 = 0,4898

Eficiencia electrotérmica = 49,0% (5-2)

3.

En este caso, utilizaremos la reacción:

$$CaC_2 + 2H_2O \Leftrightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2$$

CaC_2 = 100/64 = 1,5625 moles.
H_2O consumida = 100·(2x18/64) = 56,25 g = 3,125 moles.
$Ca(OH)_2$ producido = 100·(74/64) = 115,625 g. = 1,5625 moles.
C_2H_2 producido = 100·(26/64) = 40,625 g. = 1,5625 moles.

Dado que se consume mucho menos agua de la que se cargó, esto indica que los productos quedarán en solución, por tanto, en las tablas del apéndice, los respectivos calores de formación para estos productos se buscarán en la columna "Solución Diluida":

$$\Delta H = \Delta H,\ Ca(OH)_2 + \Delta H,\ C_2H_2 - \Delta H,\ H_2O - \Delta H,\ CaC_2$$

$$\Delta H = 1{,}5625x49900 - 1{,}5625x238800 + 3{,}125x68370 + 1{,}5625x14600 = -58688 \text{ cal.}$$

Calorías liberadas = 58688 (5-3)

Para el cálculo de la elevación de temperatura, utilizaremos la ecuación siguiente:

$$Q = WxC_m x\ t \qquad (2)$$

Q = contenido de calor de un cuerpo por encima de 0°C.
W = cantidad del cuerpo.
t = temperatura (°C)
C_m = calor específico, entre 0 y t°C

Productos de la reacción:

H_2O = 10000 – 56,25 = 9943,75 g.
$Ca(OH)_2$ = 115,625 g.
C_2H_2 = 40,625·(22,4/26) = 35 cm^3 = 0,035 lts.

Calores específicos:
Tabla XIX:
Para $Ca(OH)_2$ = 0,274
Tabla XV, para C_2H_2 y H_2O:
$C_xH_y = 0{,}20\cdot(x+1) + 1{,}35x10^{-4}\cdot(x+2)\cdot t$, por volumen.
X = # de átomos de C, entonces, para:

$C_2H_2 = 0{,}20\cdot(2+1) + 1{,}35x10^{-4}\cdot(2+2)\cdot t = 0{,}6 + 5{,}4x10^{-4}\cdot t$

Para $H_2O = 0{,}463 + 6{,}2x10^{-5}\cdot t$

Contenido de calor en los productos a cualquier temperatura:

$H_2O = 9943{,}75\cdot(0{,}463 + 6{,}2x10^{-5}\cdot t)\cdot t =$
$Ca(OH)_2 = 115{,}625x0{,}274\cdot t =$
$C_2H_2 = 0{,}035\cdot(0{,}6 + 5{,}4x10^{-4}\cdot t)\cdot t =$
Total contenido de calor = $4635{,}6\cdot t + 0{,}6165\cdot t^2$

Hay que recordar que la eficiencia del horno es del 49% y que el resto son pérdidas, por tanto, el calor que va a efectuar el calentamiento de los productos es =

58688x0,49 = 28757,12 cal. ∴
$28757{,}12 = 4635{,}6\ t + 0{,}6165\ t^2 \therefore t = 6{,}2°C$

Calentamiento producido = 6,2°C (5-3)

EJERCICIO N°6 (7)

PREGUNTAS

1. Calcular el contenido de calor (por encima de 0°C) de 15 kilogramos de estaño:
   a) Sólido, justo en el punto de fusión.
   b) Fundido, justo en el punto de fusión.
   c) A una temperatura de 1200°C

2. Calcular el contenido de calor de una mol de vapor de silicio a 3700°C (la temperatura del arco eléctrico entre electrodos de carbono).

SOLUCION

1.

a):

La Tabla XIV del Apéndice, presenta los siguientes datos para el estaño:

Temperatura de fusión = 232°C

C_m (estado sólido) = $0,0534 + 1,74x10^{-5}$ t. (Kcal./Kg)

Q_{LMP} = contenido total de calor del líquido en su punto de fusión = 27,8 Kcal./Kg.

C = calor específico en el estado líquido = 0,055 Kcal./Kg.

$$Q, \text{sólido} = 15\cdot(0,0534 + 1,74x10^{-5}x232)x232 = 200 \text{ Kcal.}$$

Contenido de calor en estado sólido en su punto de fusión = 200 Kcal. (6-1.a)

b):

$$Q, \text{líquido} = 27,8x15 = 417 \text{ Kcal.}$$

Contenido de calor en estado líquido en su punto de fusión = 417 Kcal. (6-1.b)

c):

$$Q, \text{a } 1200°C = 27,8x15 + 15x0,055x(1200 - 232) = 1516 \text{ Kcal.}$$

Contenido de calor del Sn, a 1200°C = 1516 Kcal (6-1.c)

2.

La tabla XIV del Apéndice, presenta los datos siguientes para el silicio:

Peso atómico = 28,06

T_b = temperatura de ebullición = 2290°C

Q_{VBP} = contenido total de calor del vapor en su punto de ebullición, partiendo de 0°C = 2170 Kcal/Kg.

C = calor específico del vapor = 0,13

$$Q, \text{a } 3700°C = 28,06x2170 + 28,06x0,13\cdot(3700 - 2290) = 66034 \text{ kcal.}$$

Contenido de vapor del Si, a 3700°C = 66034 kcal. (6-2)

EJERCICIO N°7 (7)

Un horno a carbón fue utilizado para fundir cátodos de cobre y necesitó 7 horas para fundir 160 toneladas métricas de cobre.

La potencia calorífica del carbón utilizado fue de 5952 kilocalorías por kilogramo.

Se utilizaron 250 kilogramos de carbón, por tonelada de cobre fundido.

La capacidad calorífica de los gases al quemar 1 kilogramo de carbón es: 4,071 + 0,000669 t.

El horno está equipado con una caldera para pérdidas de calor, la temperatura de los gases a la entrada a la caldera es de 1100°C y a la salida de la misma de 500°C.

PREGUNTAS

1. La cantidad de calor requerido para fundir el cobre.
2. La eficiencia térmica del horno durante la fusión.
3. Los caballos-caldera desarrollados por la caldera, asumiendo que esta utiliza el 94% del calor dejado por los gases que pasan a través de ella.

SOLUCION

1.

Datos para el cobre
Temperatura de fusión = 1084°C
Calor latente de fusión = 41,8 Kcal/Kg.
C_m, estado sólido = $0,092 + 1,25x10^{-5}$ t
Q, a 1084°C = $160000x(0,092 + 1,25x10^{-5}x1084)x1084$ = 18'306.592 Kcal.
Calor latente de fusión = 160000x41,8 = 6'688.000 Kcal.
Calor requerido para la fusión = 24'994.592 Kcal.

Calor requerido para fundir el Cu = 25'000.000 Kcal. (7-1)

2.

Calor total suministrado al horno = 5952x160x250 = 238'080.000 Kcal.
Calor utilizado en la fusión = 25'000.000 Kcal.
Eficiencia térmica = 25'000.000/238'000.000 = 0,105
Eficiencia térmica = 10.5% (7-2)

3.

Carbón = 250x160 = 40000 Kg.
Q, en gases al entrar a la caldera = 40000x(4,071 + 0,000669x1100)x1100
= 211'503,600 Kcal.
Q, en gases al salir de la caldera = 40000x(4,071 + 0,000669x500)x500
= 88'110.000 Kcal.
Q, dejado por los gases en la caldera = 211'503.600 – 88'110.000 = 123'393.600 Kcal.
Q, utilizado = 123'393.600x0,94 = 115'989.984 Kcal.
Q, utilizado = 115'989.984/7 = 16'569.998 Kcal/hr.
1 caballo – caldera = 8440 Kcal./hr.
Caballo – caldera = 16'569.998/8440 = 1963,3
Caballos – caldera desarrollados = 1963,3 (7-3)

EJERCICIO N°8 (7)

En la conversión de la mata de cobre, la acción química en cada una de las dos etapas está representada por las siguientes reacciones:

a) $2FeS + 3O_2 = 2FeO + 2SO_2$
b) $Cu_2S + O_2 = 2Cu + SO_2$.

Asumir que la temperatura promedio en el convertidor durante la primera etapa es de 1100°C, y durante la segunda es de 1200°C.
El aire sin embargo es soplado frío, asumir que su temperatura es de 0°C.

PREGUNTAS

Calcular para la reacción solamente, despreciando el nitrógeno, el cual no aparece en la reacción.

1. El calor para la reacción (a), estando todos los componentes excepto el oxígeno a 1100°C.

2. Lo mismo para la reacción (b), estando todos los componentes excepto el oxígeno a 1200°C.

SOLUCION

1.

En este caso se trata de calcular el *calor de una reacción a altas temperaturas, para realizar lo cual, se suma el contenido de calor de los reactivos, y se sustrae el contenido de calor de los productos al calor desarrollado en ka reacción a temperatura ambiente.*

Las cifras sobre los valores de los *calores de formación*, son a temperatura ambiente (18°C), pero para la mayoría de los propósitos, el calor de reacción así calculado puede ser considerado como igual para 0°C.

En las Tablas del Apéndice se consiguen los datos que se utilizan en este ejercicio:

Reacción (a):

$$2FeS + 3\,O_2 = 2FeO + 2SO_2$$

Calores de formación para:

$FeS = -\ 23100$ Kcal/mol.
$FeO = -\ 64300$ "
$SO_2 = -\ 70940$ "

Calores específicos de:

$FeS = 0{,}1355 + 0{,}000078\ t$: (0 – 700°C)
$FeO = 0{,}1757 + 0{,}0000104\ T + 1060/T^2$: (273 – 1173°C)
$SO_2 = 0{,}406 + 0{,}00009\ t$
$O_2 = 0{,}302 + 0{,}000022\ t$

El calor de reacción a temperatura ambiente:

$$\Delta H = -\ 2x70940 - 2x64300 + 2x23100 = -\ 224280 \text{ Kcal.}$$

No se utilizan los *calores latentes de fusión* puesto que las respectivas temperaturas de fusión son: FeS (1195°C) y FeO (1380°C).

Contenido de calor a 1100°C:
Reactivos:
Para el FeS (peso molecular = 88):

$$Q, FeS = 2x88x(0{,}1355 + 7{,}8x10^{-5}x1100)x1100 = 42843{,}68 \text{ Kcal.}$$

El oxígeno se considera a 0°C.

Productos:

Como el calor específico del FeO (peso molecular = 72) se presenta en el rango (273 – 1173°C), por instrucciones dadas en la Tabla XIX, procedemos en el cálculo así:

$$Q, FeO\ (273K) = 144x(0{,}1757 + 1{,}04x10^{-5}x273 + 1060/273^2) = 7578{,}38 \text{ Kcal.}$$
$$Q, FeO\ (1100°C = 1373K) = 37872{,}34 \text{ Kcal.}$$
$$Q, FeO \text{ neto} = 37872{,}34 - 7578{,}38 = 30093{,}94 \text{ Kcal.}$$

Para el SO_2 (= 2x22,4 = 44,8 lts.):

$$Q, SO_2 = 44{,}8x(0{,}406 + 9{,}0x10^{-5}x1100)x1100 = 24886{,}4 \text{ Kcal.}$$
$$Q, \text{ total en productos} = 30093{,}94 + 24886{,}4 = 54980{,}36 \text{ Kcal.}$$

Se asume unsigno (-) para los reactivos debido a que el calor desarrollado a temperatura ambiente tiene este signo también.

$$\Delta H\ (1100°C) = -224280 - 42843{,}68 + 54980{,}36 = -\ 212843{,}32 \text{ Kcal.}$$

Calor de reacción = - 212843,32 Kcal (8 –1.a)

Productos:

$CO = 2x22,4\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}x1700)x1700 =$ 25849 Kcal.

$SiC_{273} = 40\cdot(0,222 + 3,63x10^{-5}x273 + 7090/273^{3})x273 = 3571$ Kcal.

$SiC_{1700} = 40\cdot(0,222 + 3,63x10^{-5}x1973 + 7090/1973^{2})x1973 = 23316$

Contenido neto de calor del SiC = 23316 – 3571 = 19745 Kcal.

Total productos = 45594 Kcal.

ΔH, 1700°C = 119320 + 45594 – 56201 = 108713 kcal.

Calor de reacción a 1700°C = 108713 kcal. (9-1)

2.a:

Reacción:

$Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$

A 2000°F = 1903,3°C:

Lo primero que hay que hacer, es calcular las cantidades correspondientes a 1 libra de Fe.

Fe_3C = 1x(180/3x56) = 1,071 lbs.

C = 1x(12/3x56) = 0,071 lbs.

El calor de formación del Fe_3C por libra de Fe = 31 Kcal.

ΔH, reacción temperatura ambiente = 0 + 0 – 31 = - 31 Kcal.

Calores específicos (Kcal./Kg.):

C = 0,372 (0 – 1200°C)

Fe = 0,150 (0 – 1200°C)

Para hacer la conversión de Kcal./Kg. $\rightarrow$ Kcal./lb, se utiliza el factor 0,4536

Contenido de calor en los productos a 1093,3°C:

C = 0,071x0,4536x0,372x1093,3 = 13,1 Kcal.

Fe = 1x0,4536x0,150x1093,3 = 87,5 Kcal.

Contenido de calor en productos = 87,5 Kcal.

Contenido de calor en reactivos:

$Fe_3C = 1,071x0,4536x(0,14 + 6,2x10^{-5}x1093,3)x1093,3 = 110,4$ Kcal.

ΔH, 1093,3 = - 31 + 87,5 – 110,4 = - 53,9 Kcal.

Calor de reacción a 1093,3°C = - 54 Kcak. (9-2.a)

2.b:

A 4000°F = 2204,4°C:

Haciendo la conversión de los calores obtenidos para los productos de 1093,3°C a 2204,4°c, tendremos:

C = 13,1·(2204,4/1093,3 = 26,42 Kcal.

Fe = 74,4·(2204,4/1093.3) = 150,05 Kcal.

Contenido de calor en productos = 176,47 Kcal.

En reactivos:

$Fe_3C = 1,071x0,4536\cdot(0,14 + 6,2x10^{-5}x2204,4)x2204,4 = 269,29$ Kcal.

ΔH, 2204,4°C = - 31 + 176,47 – 296,29 = - 150,82 Kcal.

Calor de reacción a 2204,4°C = - 150,82 Kcal. (9-2.b)

EJERCICIO N°10 (7)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de la siguiente reacción:

$$Al_2O_3 + 3C = 2Al + 3CO$$

teniendo lugar en el proceso Hall a la temperatura de 1000°C. Aunque esta temperatura se encuentra por debajo del punto de fusión del Al_2O_3, la alúmina se encuentra realmente en estado líquido, disuelta en criolita. Asumir entonces, que el contenido de calor del Al_2O_3 incluye su calor de fusión.

SOLUCION

1.
Reacción:

$$Al_2O_3 + 3C = 2Al + 3CO$$

Datos:
Calores de formación (Kcal./mol):

Al_2O_3 = - 380000
CO = - 29100

Calores específicos (Kcal./peso o volumen x grado):

$Al_2O_3 = 0{,}2166 + 4{,}4\text{x}10^{-5}T + 5126/T^2$
CO = 0,324, entre 0 y 1000°C
C = 0,351 " "
Al líquido = 0,26 "

Contenido de calor del Al hasta su temperatura de fusión (659°C) = 240 Kcal/Kg.

Calores latentes:

Al_2O_3 = 250 Kcal./Kg.
Al = 94,5 "

Cálculo del calor de reacción a temperatura ambiente:

ΔH, reacción = 3x(- 29160) – (- 380000) = + 292520 kcal.

Cálculo del contenido de calor a 1000°C:

Productos:

Q, CO = 3x22,4x0,324x1000 = 21773 Kcal.
Q, Al = 2x25x240 + 2x27x94,5 + 2x27x0,26(1000 – 659) = 22851 Kcal.
Contenido de calor en productos = 44624 Kcal.

Reactivos:

Q, Al_2O_3(273) = $102\text{x}(0{,}2166 + 4{,}4\text{x}10^{-5}\text{x}273 + 5126/273^2)\text{x}273$ = 8281 Kcal.
Q, Al_2O_3(1273K) = $102\text{x}(0{,}2166 + 4{,}4\text{x}10^{-5}\text{x}1273 + 5126/1273)\text{x}1273$ = 35808 Kcal.
Q, neto del Al_2O_3 = 35808 – 8281 = 27527 Kcal.
Q, total Al_2O_3 = 27527 + 102x250 = 53027 Kcal.
Q, C = 3x12x0,351x1000 = 12636 Kca.
Contenido de calor en reactivos = 65663 Kcal.

ΔH, reacción a 1000°C = 292520 + 44624 – 65663 = 271481 Kcal.

Calor de reacción a 1000°C = + 271481 Kcal. (10-1)

EJERCICIO N°11 (7)

La reacción para la reducción del zinc a partir del mineral de zinc tostado es la siguiente:

$$ZnO + C = Zn + CO$$

PREGUNTAS

1. El calor de esta reacción cuando tiene lugar en la retorta de zinc, comenzando y terminando a 1000°C.

2. El calor requerido por la reacción, por kilogramo de vapor de zinc producido, asumiendo el hecho de que el óxido de zinc y el carbono entran fríos a la retorta (suponer a 0°C).

SOLUCION

1.

Reacción:

$$ZnO + C = Zn + CO$$

Datos:

Calores de formación (Kcal/mol)

$CO = -29160$

$ZnO = -83500$

Calores específicos:

$Zn(g) = 0{,}077$

$CO = 0{,}242 + 1{,}8x10^{-5}\ t$: (Kcal/Kg.)

$C = 0{,}206 + 1{,}78x10^{-4}\ t - 3{,}3x10^{-8}\ t^2$

$ZnO = 0{,}1149 + 2{,}07x10^{-5}\ t - 1{,}93x10^{-8}\ t^2$

Contenido de calor del Zn hasta su temperatura de fusión (905°C) = 553 Kcal/mol.

$$\Delta H\text{, reacción } (0°C) = -29160 + 83500 = +54340 \text{ Kcal.}$$

Contenido de calor a 1000°C:

Productos:

Q, Zn = 65,4x553 + 65,4x0,077·(1000 – 905) = 36645 Kcal.

Q, CO = 28·(0,242 + $1{,}8x10^{-5}$x1000)x1000 = 7280 Kcal.

Contenido de calor en productos = 43925 Kcal.

Reactivos:

Q, C = 12·(0,206 + $1{,}78x10^{-4}$x1000 – $3{,}3x10^{-8}$x1000^2)x1000 = 4212 Kcal

Q, ZnO = 81,4·(0,1149 + $2{,}67x10^{-5}$x1000 – $1{,}93x10^{-8}$x1000^2)x1000 = 9955 Kcal.

Contenido de calor en reactivos = 14167 Kcal.

$$\Delta H\text{, reacción a } 1000°C = 54340 + 43925 - 14167 = 84098 \text{ Kcal.}$$

Calor de reacción = 84098 Kcal. (11-1)

2.

En este caso, se asume que los reactivos por encontrarse a 0°C; su contenido de calor es = 0, por tanto, solo los productos aportan calor.

Para 1 Kg. de Zn, el balance de las cantidades que intervienen en la reacción será:

CO = 1x(28/65,4) = 0,428 Kg.

ZnO = 1x(81,4/65,4) = 1,245 Kg.

C = 1x(12/65,4) = 0,183 Kg.

Los calores calculados anteriormente, los ajustamos para 1 Kg. de Zn:

Q, Zn = 36645/65,4 = 560,32 Kcal.
Q, CO = 7280·(0,428/28) = 111,28 Kcal.
Calor en productos = 671,60 kcal.

ΔH, reacción = 54340/65,4 + 671,6 – 0 = 1502,5 Kcal

Calor de reacción = 1520,5 KcaL/Kg. de Zn (11-2)

EJERCICIO N°12 (9)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor específico medio del aire seco para las siguientes zonas de temperatura:

a) 77°F a 2000°F.
b) 77°F a 1000°F
c) 1000°F a 2000°F

SOLUCION

1.a:
Para este cálculo utilizaremos la siguiente ecuación (9):

$$H_2 - H_1 = C_m x(t_2 - t_1) \qquad (3)$$

donde:

$H_2 - H_1$ = cambio en el contenido calorífico por peso unitario.
C_m = calor específico medio a presión constante.
$t_2 - t_1$ = cambio de temperatura.

Datos:

Peso molecular del aire = 29
Composición en peso del aire: N = 76,8%; O = 23.2%

En la tabla A-3 de (9), encontramos:
Cuando t = 2000°F, $H_t - H_{77}$:
Para O = 15400 BTU/lb-mol
Para N = 14600 BTU/lb-mol.

Para una mol de aire:

$H_{2000} - H_{77}$ = 15400x0,232 + 14600x0,768 = 14785,6 BTU/lb-mol

Sustituyendo en (3):

C_m = {14785,6/(2000 – 77)}x(1/29) = 0,265 BTU/lb-mol·°F

Calor específico medio del aire = 0,265 BTU/lb-mol·°F (12-1.a)

1.b:
Cuando t = 1000°F, $H_t - H_{77}$:
Para O = 6970 BTU/lb-mol
Para N = 6620 "

$H_{1000} - H_{77}$ = 6970x0,232 + 6620x0,768 = 6701,2 BTU/lb-mol de aire.
C_m = {6701,2/(1000 – 77)}x(1/29) = 0,2503 BTU/lb-mol·°F

Calor específico medio del aire = 0,2505 BTU/lb-mol·°F (12-1.b)

1.c:
De 1000°F a 2000°F:

$$(H_{2000} - H_{77}) - (H_{1000} - H_{77}) = H_{2000} - H_{1000}$$

$H_{2000} - H_{1000} = 14785{,}6 - 6701{,}2 = 8084{,}4$ BTU/lb-mol.
$C_m = (1/29)\cdot\{8084.4/(2000 - 1000)\} = 0{,}2788$ BTU/lb-mol·°F
Calor específico medio para el aire, entre 1000 y 2000°F = 0,2788 BTU/lb-mol·°F (12-1.c)

EJERCICIO N°13 (9)

PREGUNTAS

1. Calcular ΔH para la siguiente reacción a 25°C, en calorías por mol de FeS:

$$3FeS + 5\,O_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 3SO_2$$

2. ¿Es esta reacción endotérmica o exotérmica?

SOLUCION

1.
Calores de formación a 25°C (298K):
FeS = - 22,72 Kcal./mol.
Fe_3O_4 = - 267,0 "
SO_2 = 70,96 "

Hay que volver a balancear la reacción para adaptarla a 1 mol de FeS, dividiendo por 3:

$$FeS + 5/3\,O_2 \rightarrow 1/3\,Fe_3O_4 + SO_2$$

ΔH, reacción = ΣΔH, productos - ΣΔH, reactivos
ΔH, reacción = - 70,96 + 1/3·(- 267) – (22,72) = - 137,24 Kcal/mol FeS
ΔH, reacción = - 127240 cal./mol de FeS (13-1)

2.
Por ser ΔH negativo, esta reacción desprende calor y por lo tanto es exotérmica.
Reacción exotérmica (13-2)

EJERCICIO N°14 (9)

PREGUNTAS

1.¿Cuánto calor es absorbido por la siguiente reacción a 25°C y 1 atmósfera de presión, en BTU por 100 libras de zinc producido?

ZnO + C → Zn + CO

SOLUCION

1.
Calores de formación a 25°C (Kcal./mol):
ZnO = - 83,17
CO = - 26,6

Cálculo del número de moles:
ZnO = 100·(81,4/65,4) = 124,46 lbs. = 1,529 lb-mol.

$CO = 100\cdot(28/65,4) = 42,81$ lbs. = 1,529 lb-mol

ΔH, reacción = $\Sigma\Delta H$, productos - $\Sigma\Delta H$, reactivos.
ΔH, reacción = 1,529x(- 29x1000) – 1,529x(- 83,17x1000) = 81908,53 lb-cal/lb-mol.

1 lb-cal = 1,8 BTU

ΔH, reacción = 81908,53 (lb-cal/lb-mol) x (1,8 BTU/lb-cal) = 147435

Calor absorbido = 147435 BTU por 100 libras de Zn producido (14-1)

EJERCICIO N°15 (9)

La hematita (Fe_2O_3) es reducida a hierro metálico por el carbono, y el producto gaseoso resultante de la reacción de reducción es una mezcla de CO y CO_2, con dos partes de CO por cada parte de CO_2, en volumen.

PREGUNTAS

1. Calcular ΔH para este proceso a 25°C en las unidades siguientes:
   a) BTU por tonelada corta de hierro producido.
   b) Kilocalorías por tonelada métrica de Fe_2O_3 reducida.

SOLUCION

1.a:
La reacción de reducción para que se cumplan las relaciones gaseosas, será:
$4/3\ Fe_2O_3 + 3C = 8/3\ Fe + 2CO + CO_2$

Datos:
Calores de formación a 25°C, ΔH_{298} (lb-cal./lb-mol):
Fe_2O_3 = - 196,500
CO = - 29,600
CO_2 = - 97,200

Cálculo del número de moles:
Fe = 1 tonelada corta = 2000 lbs.
Fe_2O_3 = 2000x(1,333x160/2,667x56) = 2857,14 lbs. = 17,857 lb-mol.
CO = 2000x(2x28/2,667x56) = 750 lbs. = 26,785 lb-mol.
CO_2 = 2000x(44/2,667x56) = 589,29 lbs. = 13,393 lb.-mol.

ΔH_{298} = $\Sigma\Delta H$, productos - $\Sigma\Delta H$, reactivos.
ΔH_{298} = - 26,785x29,600 – 13,393x97,200 + 17,857x196,500
= 1'414.300 lb-cal/lb-mol

1 lb-cal = 1,8BTU
ΔH_{298} = 1'414300x1,8 = 2'545.740 BTU/ton. de Fe.

ΔH_{298} = 2'545.740 BTU por ton. de Fe reducido (15-1.a)

1.b:
Fe_2O_3 = 1000 Kg. = 6,25 Kg.-mol
CO = 1000x(2x28/1,333x160) = 262,5 Kg. = 9,375 Kg.-mol
CO_2 = 1000x(44/1,333x160) = 206,25 Kg. = 4,6875 Kg.-mol

Los calores de formación expresados en lb-cal/lb-mol, son equivalentes a Kcal./Kg.-mol.
ΔH_{298} = - 9,375x29,600 – 4,6875x97200 + 6,25x196500 = 495000

ΔH_{298} = 495000 Kcal. por tonelada de Fe_2O_3 (15-1.b)

EJERCICIO N°16 (9)

Una muestra de carburo de tungsteno (WC) se quema a WO_3 y $CO_2(g)$ utilizando oxígeno en un recipiente blindado, para que la combustión se produzca a volumen constante.

El recipiente y el contenido están a 25°C antes de la combustión y después se les enfría a la misma temperatura.

El calor total producido en el recipiente durante la combustión y el enfriamiento subsiguiente es de 6080 joules por gramo de WC.

Supóngase que tanto el CO_2 como el O_2 se comportan como gases ideales, para lo cual es válida la ecuación de los gases ideales y el calor a presión constante (H), así como el calor a volumen constante (U) son independientes de la presión.

PREGUNTAS

1. Calcular ΔH para la reacción de la combustión a 25°C y 1 atmósfera de presión, en calorías por mol. de WC.
2. Calcular el calor de formación de carburo de tungsteno, a partir de W y C grafito a 25°C, en cal./mol.

SOLUCION

1.
Reacción de combustión:
$WC(s) + 2,5\ O_2(g) = WO(s) + CO_2(g)$
Utilizaremos las siguientes expresiones:

$$H = U + PV \qquad (4)$$

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n(g) \cdot RT \qquad (5)$$

donde:
P = presión
V = volumen
T = temperatura (K)
ΔH = cambio de calor a presión constante
ΔU = cambio de calor a volumen constante
Δn(g) = # de moles gaseosos de los productos - # de moles gaseosos de los reactivos
R = constante universal de los gases ideales
R = 1,987 cal./mol · K = 8,314 joules/mol · K
Peso atómico de W = 183,9

$\Delta U = -6080\ (J/g.\ WC) \times (183.9\ g./1\ mol) \times (1,987\ cal./8,314\ J) = -267222,6$ cal/mol.WC.
$\Delta n(g)$ = moles de CO_2 – moles de $O_2 = 1 - 2,5 = -1,5$
Utilizando la ecuación (5):

$$\Delta H_{298} = -267222,6 - 1,5 \times 1,987 \times 298 = -268111$$

$$\mathbf{\Delta H_{298} = -268111\ cal/mol.WC\ (16\text{-}1)}$$

2.
Los calores de formación, de combustión, de reacción, etc; para casi todos los compuestos se encuentran tabulados, normalmente para 25°C. Sobre esa base vamos a estructurar el siguiente sistema de reacciones con sus respectivos calores de formación y/o reacción:

$\cancel{WO_3} + \cancel{CO_2} = WC + 2,5\ O_2$: $\Delta H_{298} = +268111$ cal/mol.
$W + \cancel{1,5\ O_2} = \cancel{WO_3}$: $\Delta H_{298} = -200840$ cal./mol.
$C + \cancel{O_2} = \cancel{CO_2}$: $\Delta H_{298} = -94050$ cal/mol.
$W + C(g) = WC$: $\Delta H_f = -26779$ cal./mol.

Calor de formación del WC a 25ºC = - 26779 cal./mol. (16-2)

EJERCICIO Nº17 (9)

PREGUNTAS

1. Calcular ΔH para la siguiente reacción a 1000ºC, en calor

$$CO_2 + H_2 = H_2O(g) + CO$$

SOLUCION

1.

Para evaluar ΔH a temperaturas mayores que la ambiente (25ºC = 298K), haremos uso de las siguientes expresiones:

$$\Delta H_T = \Delta H_{298} + \int_{298}^{T} \Delta C_p dT \qquad (6)$$

$$\Delta C_p = \sum C_p(prductos) - \sum C_p(reactivos) \qquad (7)$$

$$H_T - H_{298} = aT + bT^2 + cT^{-1} + d \qquad (8)$$

donde:

C_p = capacidad calorífica a presión constante, y tiene la forma $(a + 2bT - cT^{-2})$

a, b, c, d... = constantes experimentales, se encuentran en tablas (9).

Datos:

Calores de formación de compuestos ($\Delta H_{f,298}$) = cal/mol.

CO_2 = - 97200

CO = - 29600

$H_2O(g)$ = - 57800

H_2 = 0

Capacidades caloríficas a presión constante (C_p) = cal./mol.K

$CO = 6{,}79 + 2x0{,}49x10^{-3}T - 0{,}11x10^5T^{-2}$

$H_2O(g) = 7{,}17 + 2x1{,}28x10^{-3}T + 0{,}08x10^5T^{-2}$

$H_2 = 6{,}52 + 2x0{,}39x10^{-3}T + 0{,}12x10^5T^{-2}$

$CO_2 = 10{,}55 + 2x1{,}08x10^{-3}T - 2{,}04x10^5T^{-2}$

ΔH_{298}, reacción = $\sum \Delta H_{298}$, productos - $\sum \Delta H_{298}$, reactivos.

ΔH_{298}, reacción = - 29600 – 57800 + 97200 = + 9800 cal/mol.

Con los datos de C_p y la ecuación (7):

$\Delta C_p = C_p, CO + C_p, H_2O - C_p, CO_2 - C_p, H_2$

$\Delta C_p = - 3{,}11 + 6x10^{-4}T + 1{,}89x10^5T^{-2}$

Dando valores a la ecuación (6):

$$\Delta H_{1273} = 9800 + \int_{298}^{1273} \left(-3{,}11 + 6x10^{-4}T + 1{,}89x10^5T^{-2}\right)dT$$

= 7713 cal/mol

ΔH_{1273} = 7713 cal./mol (17-1)

Este mismo cálculo se puede realizar por medio de la ecuación (8):

$\Delta H_T - \Delta H_{298} = \Delta aT + \Delta bT^2 + \Delta cT^{-1} + \Delta d$

Los valores de estas constantes son los mismos que se dieron para C_p, por tanto:

$\Delta aT = (6{,}79 + 7{,}17 - 6{,}52 - 10{,}55)xT = - 3{,}11T$

$\Delta bT^2 = (0{,}49 + 1{,}28 - 0{,}39 - 1{,}08)x10^{-3}T^2 = 0.3x10^{-3}T^2$

$\Delta cT^{-1} = (0{,}11 - 0{,}08 - 2{,}04 + 0{,}12)x10^5T^{-1} = - 1{,}89x10^5T^{-1}$

$\Delta d = (- 2105 - 2225 + 3926 + 1939) = 1535$

$\Delta H_{1273} = - 3{,}11x1273 + 0{,}3x10^{-3}x1273^2 - 1{,}89x10^5x1273^{-1} + 1535 + 9800 = 7714$

ΔH_{1273} = 7714 cal/mol (17-1)

EJERCICIO N°18 (9)

PREGUNTAS

1. Derivar una ecuación, expresando ΔH en calorías por mol, como una función algebraica de la temperatura (K) para la siguiente reacción:

$$CO + ½\, O_2 = CO_2$$

SOLUCION

1.

Partimos de la ecuación:

$$\Delta H = \int \Delta C_p dT$$

Datos:

ΔH_{298} (cal/mol), para:

$CO_2 = - 97200$

$CO = - 29600$

C_p (cal/mol.·K), para:

$CO_2 = 10{,}55 + 2x1{,}08x10^{-3}T - 2{,}04x10^5T^{-2}$

$O_2 = 7{,}16 + 2x0{,}5x10^{-3}T - 0{,}4x10^5T^{-2}$

$CO = 6{,}79 + 2x0{,}49x10^{-3}T - 0{,}11x10^5T^{-2}$

$\Delta C_p = 0{,}18 + 6{,}8x10^{-4}T - 1{,}73x10^5T^{-2}$

$\Delta H_{298} = - 97200 + 29600 = - 67600$ cal/mol.

$$\Delta H = \int \left(0{,}18 + 6{,}8x10^{-4}T - 1{,}73x10^5T^{-2}\right)dT$$

$\Delta H = 0{,}18T + (6{,}8x10^{-4}/2)T^2 + 1{,}73x10^5T^{-1} + I$

Como integramos sin fronteras, aparece una constante de integración "I", para evaluar la cual le damos a T un valor conocido (298K); teniendo en cuenta que en ese instante, $\Delta H = \Delta H_{298}$ que ya se determinó:

$I = - 67600 - 0{,}18x298 - ½\,(6{,}8x10^{-4}x298^2) - 1{,}73x10^5x298^{-1} = - 68264.\ \therefore$

$\Delta H = 0{,}18T + ½\, x6{,}8x10^{-4}T^2 + 1{,}73x10^5T^{-2} - 68264$ (18-1)

EJERCICIO N°19 (8)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor desprendido, expresado en BTU, cuando se mezclan a 25°C; 50 libras de H_2SO_4 con 50 libras de H_2O.

SOLUCION

1.

El calor de mezcla es el calor de solución, cuando el soluto y el solvente son líquidos (8)

H_2SO_4 = 50 lbs·(0,4536 Kg./1 lb.) = 22,60Kg. = H_2O
H_2SO_4 = 22,68/98 = 0,231 Kg.- mol.
H_2O = 22,68/18 = 1,26 Kg.- mol.
Moles de H_2O/moles de H_2SO_4 = 1,26/0,231 = 5,45.

La figura # 75, página 334 (8), presenta en las abscisas la relación moles de agua por mol de ácido, ya calculada y en las ordenadas las kilocalorías por kilogramo mol de ácido. De allí se extrajo que:

Para una relación de 5,45; ΔH (solución) = - 14000 Kcal./kg.-mol.
1 Kilocaloría = 3,968 BTU.
ΔH, solución = - 14000(Kcak/Kg.-mol) x 0,231 Kg.-mol x (3,968 BTU/1 Kacl.
= - 12776,96 BTU.

Calor de mezcla = - 12777 BTU (19-1)

EJERCICIO N°20 *(8)*

En la combustión a volumen constante de 2 gramos de $H_2(g)$ para formar agua líquida se desarrollan 67,45 Kilocalorías.

PREGUNTAS

1.Calcular la cantidad de calor que se desarrolaría si la reacción se realiza a presión constante a 17°C.

SOLUCION

1.

Reacción:
$H_2(g) + ½ O_2(g) = H_2O(l)$

Vamos a utilizar la expresión (5):
$\Delta H = \Delta U + \Delta n(g) \cdot RT$
Debemos calcular Δn(g):
Moles de H_2 = 2/2 = 1 g.-mol
Moles de O_2 = 2x(16/2)x(1/32) = 0,5 g.-mol.
Los moles de agua no intervienen en el cálculo por estar en estado líquido:
Δn(g) = 0 – 0,5 – 1 = - 1,5
ΔH = - 67450 – 1,5x1,987x290 = - 68314 cal.

A presión constante se desarrollarían 68314 cal (20-1)

EJERCICIO N°21 (8)

Cuando 1 gramo de naftaleno ($C_{10}H_8$) se quema en una bomba calorimétrica condensándose el agua formada, se desprenden 9621 calorías a 25°C.

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de combustión a presión constante y a 25°C, si el vapor de agua permanece sin condensar.

SOLUCION

1.

Reacciones de combustión:

1) $C_{10}H_8(s) + 12\ O_2(g) = 10CO_2(g) + 4H_2O(l)$: $\Delta H_{298} = -\ 9621$ cal/g.

2) $C_{10}H_8(s) + 12\ O_2(g) = 10CO_2(g) + 4H_2O(g)$: $\Delta H_{298} = ?$

Por la observación de las reacciones (1) y (2) se puede ver que se diferencian en que en (1) el agua está líquida y en (2) se encuentra en forma de vapor. Cuando el agua se condensa desprende calor, mientras que si permanece en estado gas este calor lo conserva. El valor del calor desprendido será entonces mayor cuando se condensa a líquido.

El cambio calorífico sería = ΔH, agua líquida – calor utilizado en pasar de 25 a 100°C – calor latente de vaporización.

Datos para el agua:

Calor latente de vaporización = 9717 cal/g.-mol

C_p, a 25°C = 8,084 cal/g.-mol

$H_2O = 1 \cdot (4x18/128) = 0{,}5625$ g. $= 3{,}125x10^{-2}$ g.-mol

Calor latente de vaporización $= 3{,}125x10^{-2}x9717 = 304$ cal.

$\Delta H_{100} = 3{,}125x10^{-2}x8{,}084\cdot(100 - 25) = 19$ cal.

$\Delta H_T = -\ 9621 + 304 + 19 = -\ 9298$ cal/g. de $C_{10}H_8$

Calor desprendido = 9298 cal./gramo (21-1)

EJERCICIO N°22 (8)

El dióxido de azufre se oxida con un 100% de exceso de aire con una conversión del 80% a SO_3.

Los gases entran al convertidor a 400°C y salen a 450°C.

PREGUNTAS

1. ¿Cuántas kilocalorías se absorben en el cambiador de calor del convertidor por kilogramo - mol de SO_2 introducido?.

SOLUCION

1.

Reacción de oxidación:

$$SO_2 + \frac{1}{2}\ O_2 \Leftrightarrow SO_3$$

Datos:

Calores normales de formación a 25°C, 1 atm. (Kcal./mol-g.):

$SO_2 = -\ 70960$

$SO_3 = -\ 94450$

Capacidades caloríficas medias (cal/mol-g), pag.269 (8):

A 400°C:

SO_2 = 10,94
Aire = 7,152
SO_3 = 15,22
N_2 = 7,089
O_2 = 7,406

A 500ºC:

SO_2 = 11,22
Aire = 7,225
SO_3 = 15,82
N_2 = 7,159
O_2 = 7,515

La expresión que utilizaremos para este cálculo es:
$\Delta H = \sum\Delta H$, 25ºC + $\sum\Delta H$, productos - $\sum\Delta H$, reactivos.
O_2, teórico = 0,5 Kg.-mol.
O_2, suministrado = 0,5x2 = 1,0 kg.-mol.
Aire suministrado = 1/0,21 = 4,762 Kg.-mol.
N_2, presente = 4,762 – 1 = 3,762 Kg.-mol.
O_2, no utilizado = 1 – 0,5x0,8 = 0,6

$\sum\Delta H$, 25ºC = - 94450 + 70960 = - 23490 Kcal/Kg-mol.
Contenido de calor en los reactivos al entrar:
SO_2 = 10,94x1x(400 – 25) = 4102,5 Kcal.

Aire = 7,152x4,762x(400 – 25) = <u>12771,7 Kcal.</u>
$\sum\Delta H$, reactivos = 16974,2 Kcal.

Contenido de calor de los gases al salir:
SO_3 = 1,0x{(15,22 + 15,82)/2 x (450 – 25)} = 6596 Kcal.
N_2 = 3,762x{(7,089 + 7,159)/2 x (450 – 25)} = 10050,2 Kcal.
O_2 = 0,6x{1/2x(7,406 + 7,515) x (450 – 25)} = <u>1902,4 Hcal.</u>
$\sum\Delta H$, productos = 18548,6 Kcal.

ΔH = 18548,6 – 23490 – 16874,2 = - 21815.6 Kcal.

Calor absorbido por el cambiador = - 21815,6 Kcal. (22-1)

EJERCICIO Nº23 (8)

Vapor de agua a 200ºC, recalentado 50°, atraviesa un lecho de coque que inicialmente se encuentra a 1200ºC.

Los gases salen a una temperatura media de 800ºC con la siguiente composición en volumen sobre base seca:

H_2	53,5%
CO	39,7
CO_2	6,8

Del vapor introducido, el 30% pasa sin descomponerse.

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de reacción, en kilocalorías por kilogramo mol de vapor introducido. Calor específico medio del coque(o a 1200°C) = 0,35.

SOLUCION

1.

Reacción de gasificación:

$$2C + 3H_2O = 3H_2 + CO + CO_2$$

Base de cálculo = 1 kg.-mol de H_2O

Cálculos estequiométricos:

H_2O = 1 Kg. – mol = 22,4 m^3
H_2O que reacciona = 22,4x0,7 = 15,68 m^3 = 0,7 Kg. – mol.
H_2O que no reacciona = 0,3 Kg. – mol.
H_2 producido = 15,68 m^3 = 0,7 Kg. – mol.
CO producido = 15,68·(39,7/53,5) = 11,635 m^3 = 0,5194 Kg. – mol.
CO_2 = 15,68·(6,8/53,5) = 1,993 m^3 = 0,089 Kg. – mol.
C, total = 11,635·(12/22,4) + 1,993·(12/22,4) = 7,301 Kg. = 0,6084 Kg. – mol.

Datos:

Capacidades caloríficas medias:
H_2O = 8,804 (a 100°C); 8,177 (a 200°(); 8,215 (a 300°C).

A 800°C:

H_2 = 7,060; CO = 7,443; CO_2 = 11,53

Calores de formación a 25°C (Kcal./mol-g):
$H_2O(l)$ = - 68317,4; calor latente de vaporización = 9717
$H_2O(g)$ = - 68317,4 + 9717 = - 58600,4
CO = - 26415,7
CO_2 = - 94051,8

$\Delta H = \sum\Delta H(P) + \sum\Delta H(25°) - \sum\Delta H$®

$\sum\Delta H$ (25°) = - 0,5184x26415,7 – 0,089x94051,8 + 0,7x58600 = 18929 Kcal.

Contenido de calor en material al entrar:
H_2O = 8,084x1x(100 – 25) + 1x9717 + {1/2 x (8,177 + 8m215)x(250 – 100) = 11553 Kcal.
C = 7,301x0,35x1200 = 3066 Kcal.
$\sum\Delta H$® = 11553 + 3066 = 14619 Kcal.

Contenido de calor en los productos al salir:
H_2O = 0,3x8,084·(100 – 25) + 0,3x9717 + 0,3/2x(8,177 + 8,215)x(800 – 100) = 4818 Kcal.
H_2 = 0,7x7,060·(800 – 25) = 3830 Kcal.
CO = 0,5194x7,443·(800 – 25) = 2996 Kcal.
CO_2 = 0,089x11,53·(800 – 25) = 795 Kcal.
$\sum\Delta H$ (P) = 12439 Kcal.

ΔH = 18929 – 14619 + 12439 = 16749 Kcal.

Calor de reacción = 16749 (23-1)

EJERCICIO Nº24 *(8)*

Una piedra caliza, $CaCO_3$ puro, se calcina en un horno vertical continuo por combustión de un gas pobre en contacto directo con la carga.

Los productos gaseosos de combustión y calcinación suben verticalmente atravesando la carga que desciende.

La caliza se carga a 25°C y la cal calcinada se recoge a 900°C.

El gas pobre entra a 600°C y se quema con la cantidad de aire teóricamente necesaria a 25°C. Los productos gaseosos salen a 200°C.

El análisis del gas pobre, en volumen es el siguiente:

CO_2	9,21%
O_2	1,62
CO	13,60
N_2	75,57

PREGUNTAS

1. Calcular los metros cúbicos (0°C, 760 mm Hg) del gas pobre que se necesitan para calcinar 100 kilogramos de caliza, despreciando las pérdidas de calor y el contenido en humedad del aire y del gas pobre.

SOLUCION

1.

Reacción de descomposición de la caliza:

$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

$CaCO_3$ = 100 Kg. = 1 Kg. – mol.

CaO = 100·(56/100) = 56 Kg. = 1 Kg.-mol.

CO_2 = 100·(44/100) = 44 Kg. = 1 Kg.-mol. = 22,4 m^3

Datos:

Calores de formación (Kcal./Kg.-mol):

$CaCO_3$ = - 288,45x1000 = - 288450

CaO = - 151,9x1000 = - 151900

CO_2 = - 94,0518x1000 = - 94052

Calor requerido para calcinar (descomponer) el $CaCO_3$:

ΔH, 25°C = - 94052 – 151900 + 288450 = 42498 Kcal

Calor específico del CaO (vía gráfica) = 0,28 Kcal./Kg. (a 900°C) .

Calor con que sale el CaO = 56x0,28·(900 – 25) = 13720 Kcal.

Contenido de calor de los gases al entrar:

Datos:

Capacidades caloríficas medias entre 25 y 600°C (Kcal./Kg.-mol.K):

CO_2 = 11,053

CO = 7,289

O_2 = 7,616

N_2 = 7,229

Q, CO_2 = 0,0921x11,053·(600 – 25) = 585 Kcal./Kg.-mol

Q, CO = 0,136x7,289·(600 – 25) = 570 Kcal./Kg.-mol

Q, O_2 = 0,0162x7,616·(600 – 25) = 71 Kcal./Kg.-mol

Q, N_2 = 0,7557x7,229·(600 – 25) = 3141 Kcal./Kg.-mol

Contenido de calor del gas al entrar = 4367 Kcal./Kg.-mol

Combustión del gas pobre:

$$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$$

Calor de combustión del CO = - 67,6361x1000 = 67636,1 Kcal./Kg.-mol.

Calor de combustión = 0,136x(- 67636,1)) – 9196,5 Kcal.

Productos de combustión = $CO_2 + N_2$

CO_2, total = del $CaCO_3$ + combustión + gas pobre.

CO_2, total = 1 + 0,136 + 0,0921 = 1,2281 Kg.-mol

O_2 de reacción = 0,136/2 = 0,068 Kg.-mol

O_2 del aire = 0,068 – 0,0162 = 0,0518 Kg.-mol.

N_2, total = gas pobre + aire .

N_2, total = 0,7557 + 0,0518·(79/21) = 0,9506 Kg.-mol

Contenido de calor de los gases al salir:

Datos:

Capacidad calorífica media a 200ºC (Kcal./Kg.-mol.K):

$CO_2 = 9,701$

$N_2 = 6,996$

$Q, CO_2 = 1,2281x9,7013(200 - 25) = 2085$ Kcal./Kg.-mol

$Q, N_2 = 0,9506x6,996 \cdot (200 - 25) = 1164$ Kcal./Kg.-mol.

Contenido de calor de los gases al salir = 3249 Kcal./Kg.-mol

Gas pobre = (42498 + 13720) Kcal. / (4367 + 9196,5 + 3249) Kcal./Kg.-mol

= 3,344 Kg.-mol.

Gas pobre = 3,334 Kg.-mol x (22.4 m^3/Kg.-mol) = 74,9 m^3

Gas pobre = 75 m^3 (24-1)

EJERCICIO Nº25 (11)

Loa cambios de entalpía para las siguientes reacciones son los siguientes:

a) $2B + 3H_2 + 3O_2$ + aq, = $2H_3BO_3$(sol.dil): ΔH^o_{298} = - 512.8 Kcal.

b) $B_2O_3 + 3H_2O(l)$ + aq, = $2H_3BO_3$(sol.dil): ΔH^o_{298} = - 4,12 Kcal.

$H_2 + ½ O_2 = H_2O(l)$: ΔH^o_{298} = - 68,73 Kcal.

PREGUNTAS

1. Calcular el calor estándar de formación del B_2O_3 en términos de por mol de B_2O_3 y por gramo de B_2O_3. Los pesos atómicos son: B = 10,82; O = 16.

SOLUCION

1.

Sabemos que *el calor normal de formación de un compuesto*, es la producción de una mol de esta a partir de sus elementos.

Cuando se cambia el sentido de una reacción, el signo del calor de esa reacción también cambia. En este caso vamos a cambiar el sentido de las reacciones (b) y (c). A esta última la vamos a multiplicar por 3 y finalmente sumaremos algebraicamente miembro a miembro, tanto las reacciones como sus respectivos calores cancelando términos idénticos pero en distintos extremos del signo de igualdad. Al final y como resultado de lo anterior obtendremos la reacción (d) con su respectivo calor de formación. Como vamos a obtener una mol, ese será *el calor molar de formación.:*

a) $2B + 3H_2 + 3O_2$ + aq. = $2H_3BO_3$(sol.dil): ΔH^o_{298} = - 512,8 Kcal.

b) $2H_3BO_3$(sol.dil) = $B_2O_3 + 3H_2O(l)$ + aq.: ΔH^o_{298} = + 4,12 Kcal.

c) $3H_2O(l) = 3H_2 + 3/2\ O_2$: ΔH^o_{298} = +3x68,73 Kcal

$2B + 1.5\ O_2 = B_2O_3$: ΔH^o_{298} = - 302,49 Kcal.

Calor estándar de formación = - 302,49 Kcal./mol de B_3O_3 (25-1)

Peso molecular del B_2O_3 = 2x10,82 + 3x16 = 69,64 g

ΔH^o_{298} = - 302,49 (Kcal./mol)x(1 mol/69,64 g.) = - 4,344

Calor de formación = . 4,344 Kcal./gramo de B_2O_3 (25-1)

EJERCICIO N°26 (11)

El carburo de calcio es considerado como un combustible potencial en un convertidor básico de oxígeno, y se espera que haga combustión a CaO y C O ó CO_2; dependiendo de las condiciones.

PREGUNTAS

Si el calor requerido para elevar la temperatura de la chatarra de acero a 1600°C es de 333 Kcal. / Kg., calcular cuantos kilogramos de chatarra de acero pueden ser cargados por 1000 kilogramos de CaC_2, cuando:

1. Todo el CaC_2 es consumido para formar CO.
2. Todo el CaC_2 es consumido para formar CO_2
3. 60% del CaC_2 es utilizado para producir CO_2 y el resto para CO.

Asumir que la reacción tiene lugar a 25°C.

SOLUCION

1.

Calores de formación, ΔH^o_{298} x 1000 (Kcal./mol):

CaC_2 = - 14,1

CaO = - 151,8

CO = - 26,42

CO_2 = - 94,06

Reacción de combustión:

$$CaC_2 + 1,5\ O_2 = CaO + 2CO$$

Cálculo del número de moles:

CaC_2 = 1000 Kg. = 15,625 moles.

CaO = 1000·(56/64) = 875 Kg. = 15,625 moles

CO = 1000·(2x28/64) = 875 Kg. = 31,25 moles.

ΔH^o_{298} = [31,25x(- 26,42) + 15,625x(- 151,8) – 15,625x(- 14,1)]x1000

= 2'977.200 Kcal.

Chatarra = 2'977.200 Kcal./333 Kcal./Kg. = 8940 Kg.

Chatarra que puede ser cargada = 8940 Kg. (26-1)

2.

Reacción de combustión:

$$CaC_2 + 2,5\ O_2 = CaO + 2CO_2$$

ΔH^o_{298} = 1000x(-2x94,06 – 151,8 + 14,1) = - 325820 Kcal/mol de CaC_2

ΔH^o_{298} = - 325820 (Kcal./mol.CaC_2)x(mol.CaC_2/64Kg.)x1000 Kg. = 5'091.000 Kcal.

Chatarra = 5'091.000 Kcal./333 (Kcal./Kg.) = 15288 Kg.

Chatarra que se puede cargar = 15288 Kg. (26-2).

3.

Debemos ajustar el balance de la reacción, de modo que el 60% del gas sea CO_2. Esto lo hacemos, tomando en consideración que el CaC_2 tiene 2 átomos de C y todo este debe pasar al gas, por tanto el 60% del C → CO_2:

Reacciones de combustión:

a) $0,6CaC_2 + 0,9\ O_2 = 0,6CaO + 1,2CO_2$

b) $\underline{0,4CaC_2 + 0,6\ O_2 = 0,4CaO + 0,8CO}$

c) $CaC_2 + 1,5\ O_2 = CaO + 1,2CO_2 + 0,8CO$.

ΔH^o_{298} = 1000x(- 0,8x26,42 – 1,2x94,06 – 151,8 + 14,1) = - 271708 Kcal./mol. CaC_2

ΔH^o_{298} = - 271708(Kcal./mol.CaC_2)x(mol. CaC_2/64 Kg.)x1000 = - 4'245.437,5 Kcal.

Chatarra = 4'245437,5/333 = 12749 Kg.

Chatarra que se puede cargar = 12749 Kg. (26-3)

EJERCICIO N°27 (11)

La reducción del óxido de hierro en el alto horno, procede de acuerdo a las siguientes reacciones:

$3Fe_2O_3 + CO = 2Fe_3O_4 + CO_2$: ΔH^o_{298} = - 12,7 Kcal.

$Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2$: ΔH^o_{298} = + 9,8 Kcal.

$FeO + CO = Fe + CO_2$: ΔH^o_{298} = - 4,4 Kcal.

PREGUNTAS

1. Calcular ΔH^o_{298} para la reacción:

$$Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$$

SOLUCION

1.

Para obtener los resultados pretendidos, la primera reacción la vamos a multiplicar por (1/3), la segunda por (2/3) y la tercera por (2); haciendo lo mismo con las respectivas entalpías de reacción para luego proceder a cancelar términos:

$(1/3)x(3Fe_2O_3 + CO = \cancel{2Fe_3O_4} + CO_2)$: $\Delta H^o_{298} = (1/3)x(-12,7)$ Kcal.

$(2/3)x(\cancel{Fe_3O_4} + CO = \cancel{3FeO} + CO_2)$: $\Delta H^o_{298} = (2/3)x(+ 9,8)$ Kcal.

$\underline{(2) \text{ x } (\cancel{FeO} + CO = Fe + CO_2:}$ $\underline{\Delta H^o_{298} = (2) \text{ x } (- 4,4) \text{ Kcal.}}$

$Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$: $\Delta H^o_{298} = -$ 6,5 Kcal.

ΔH^o_{298} **= - 6,5 Kcal.** (27-1)

EJERCICIO N°28 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de reacción del proceso Hall-Heroult, en el cual se realiza la suiente reacción:

$$Al_2O_3 + 3C = 3CO + 2Al.$$

A 25°C, a partir de los siguientes datos:

$2Al + 3/2\ O_2 = Al_2O_3$: $\Delta H^o_{298} = - 7400$ cal. por g. de Al que reacciona.

$C + ½\ O_2 = CO$: $\Delta H^o_{298} = - 2250$ cal. por g. de C que reacciona

Pesos atómicos: Al = 27; C = 12.

SOLUCION

1.

$Al_2O_3 = 2Al + 3/2\ O_2$: $\Delta H^o_{298} = + 7400 \text{ x } 27 \text{ x } 2 = + 399600$ cal.

$\underline{3C + 3/2\ O_2 = 3CO:}$ $\underline{\Delta H^o_{298} = - 2250 \text{ x } 3 \text{ x } 12 = - 81000 \text{ cal.}}$

$Al_2O_3 + 3C = 2Al + 3CO$: ΔH^o_{298} $= + 318600$ cal.

ΔH^o_{298} **= + 318,6 Kcal.** (28-1)

EJERCICIO N°29 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular la entalpía del NiO a 1707°C (1980)K.

2. El calor requerido para elevar la temperatura de 1 mol. de NiO de 25°C (298K) a 1707°C (1980K).

Datos:

ΔH^o_{298}, NiO = - 57,5 Kcal./mol.

C_p, NiO = 12,91 cal/grado/mol.

SOLUCION

1.

Debido a que C_p, viene expresado en calorías, ΔH^o_{298} también debe llevarse a estas unidades. Dándole valores a la expresión (6), tendremos:

$$\Delta H^o{}_{1980} = -57500 + \int_{298}^{1980} 12{,}91\, dT = -35785{,}4 \text{ cal.}$$

ΔH^o_{298} = - 35,79 Kcal./mol. (29-1)

2.

El calor requerido para elevar de 25°C a 1707°C 1 mol de NiO será:

$\Delta H^o{}_{1980} - \Delta H^o{}_{298}$ = - 35785 + 57500 = + 21715 cal.

Calor requerido = 21,715 Kcal./mol. (29-2)

EJERCICIO N°30 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de reacción para la clorinización del óxido de zirconio a 25°C y a 777°C, de acuerdo a la reacción:

$$ZrO_2 + 2Cl_2 = ZrCl_4 + CO_2.$$

Datos:

Para $ZrCl_4$: ΔH^o_{298} = - 234,7 Kcal./mol

$C_p = 31{,}92 - 2{,}91 \times 10^5 T^{-2}$ cal./mol/grado.

Para CO_2: $\Delta H^o_{298} = -94,05$ Kcal./mol.

$$C_p = 10,55 + 2,16x10^{-3}T - 2,05x10^5T^{-2} \text{ cal./mol./grado}$$

Para ZrO_2: $\Delta H^o_{298} = -259,5$ Kcal./mol

$$C_p = 16,64 + 1,8x10^{-3}T - 3,36x10^5T^{-2}$$

Para Cl_2: $C_p = 8,82 - 0,06x10^{-3}T - 0,68x10^5T^{-2}$

Para el C: $C_p = 4,10 + 1,02x10^{-3}T - 2,10x10^5T^{-2}$

SOLUCION

1.

A 25ºC (298K):

$$\Delta H^o_{298} = \sum\Delta H^o_{298}\text{, prod.} - \sum\Delta H^o_{298}\text{, react.}$$

$$\Delta H^o_{298} = -94,05 - 234,7 + 259,5 = -69,25$$

$$\mathbf{\Delta H^o_{298} = -69,25\ Kcal.}\ (30\text{-}1)$$

A 777ºC (1050K):

$$\Delta H^o_{1050K} = \Delta H^o_{298K} + \int_{298}^{1050} \Delta C_p dT$$

$\Delta C_p = \sum\Delta C_p$, prod. - $\sum\Delta C_p$, react.

$$\begin{aligned}\sum C_p\text{, prod.} &= C_p, CO_2 + C_p, ZrCL_4\\ &= 10,55 + 2,16x10^{-3}T - 2,05x10^5T^{-2}\\ &+ \underline{31,92 \qquad\qquad -2,91x105T^{-2}}\\ &\ \ 42,47 + 2,16x10^{-3}T - 9,96x10^5T^{-2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum C_p\text{, react.} &= C_p, ZrO_2 + 2C_p, Cl_2 + C_p, C\\ &= 16,64 + 1,80x10^{-3}T - 3,36x10^5T^{-2}\\ &+ 2x8,82 - 2x0,06x10^{-3}T - 2x0,68x10^5T^{-2}\\ &+ \underline{4,10 + 1,02x10^{-3}T - 2,10x10^5T^{-2}.}\\ &\ \ 38,38 + 2,7x10^{-3}T - 6,82x10^5T^{-2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta C_p &= 42,47 + 2,16x10^{-3}T - 4,96x10^5T^{-2}\\ &- \underline{38,38 + 2,70x10^{-3}T + 6,82x10^5T^{-2}}\\ &\ \ 4,09 - 5,40x10^{-4}T + 1,86x10^5T^{-2}\end{aligned}$$

$$\Delta H^o_{1050K} = -69250 + \int_{298}^{1050}\left(4,09 - 5,4x10^{-4}T + 1,86x10^5T^{-2}\right)dT$$

$$\Delta H^o_{1050K} = -69250 + 4,09x(1050 - 298) - \frac{5,4x10^{-4}}{2}x(1050^2 - 298^2) - 1,86x10^5x\left(\frac{1}{1050} - \frac{1}{298}\right)$$

$$= -660001 \text{ cal.}$$

$$\mathbf{\Delta H^o_{1050K} = -66,0\ Kcal.}\ (30\text{-}1)$$

EJERCICIO N°31 (11)

Las capacidades caloríficas molares medias a presión constante para el H_2, O_2 y vapor de H_2O, en el rango de temperaturas de 25°C(298K) a 100°C(373K), son respectivamente: 6,92; 7,04 y 8,03 cal./mol./grado.

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de formación del vapor de agua a 100°C, si ΔH^o_{298} para el agua es igual a – 57,80 Kcal./mol.

SOLUCION

1.
Reacción:
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$

A 100°C = 373K:

$$\Delta H^o{}_{373} = \Delta H^o{}_{298} + \int_{298}^{373} \Delta C_p\, dT$$

$\Delta C_p = \sum \Delta C_p$ prod. - $\sum \Delta C_p$ react.
$\Delta C_p = 8,03 - 6,92 - \frac{1}{2} \times 7,04 = -2,41$ cal/mol/grado.

Dándole valores a la integral:
$\Delta H^o{}_{373} = -57800 - 2,41 \cdot (373 - 298) = -57981$ cal.
Calor de formación del vapor de agua a 100°C = - 57,981 Kcal./mol (31-1)

EJERCICIO N°32 (11)

En la tostación a muerte del ZnS, ocurre la siguiente reacción:

$$2ZnS + 3\, O_2 = 2ZnO + 2SO_2$$

PREGUNTAS

1. Con la ayuda de los siguientes datos, encontrar el calor estándar de reacción a 25°C (298K) y a 827°C (1100K).

Para ZnS: $\Delta H^o_{298} = -48,2$ Kcal./mol.
$C_p = 12,16 + 1,24 \times 10^{-3} T - 1,36 \times 10^5 T^{-2}$ cal/mol/grado.

Para el O_2: $C_p = 7,16 + 1,0 \times 10^{-3} T - 0,4 \times 10^5 T^{-2}$ "

Para ZnO: $\Delta H^o_{298} = -83,2$ Kcal./mol.
$C_p = 11,71 + 1,22 \times 10^{-3} T - 2,18 \times 10^5 T^{-2}$ "

Para SO_2: $\Delta H^o_{298} = -70,95$ Kcal./mol.
$C_p = 10,38 + 2,54 \times 10^{-3} T - 1,42 \times 10^5 T^{-2}$ "

SOLUCION

1.

Calor de reacción a 25°C (298K):

$\Delta H^{\circ}_{298} = \sum\Delta H^{\circ}_{298}$, prod. - $\sum\Delta H^{\circ}_{298}$, react.

$$\Delta H^{\circ}_{298} = 2x(-70{,}95) + 2x(-83{,}2) - 2x(-48{,}2) = -211{,}9$$

$$\mathbf{\Delta H^{\circ}_{298} = -211{,}9\ Kcal/mol.}\ (32\text{-}1)$$

Calor de formación a 827°C (1100K):

$$\Delta H^{\circ}_{1100} = \Delta H^{\circ}_{298} + \int_{298}^{1100} \Delta C_p\, dT$$

$$\Delta C_p = \sum\Delta C_p,\ prod. - \sum\Delta C_p,\ react.$$

$$\begin{aligned}\sum C_p,\ prod. &= 2C_p,\ ZnO + 2C_p,\ SO_2\\ &= 2x(11{,}71 + 1{,}22x10^{-3}T - 2{,}18x10^5T^{-2})\\ &+ \underline{2x(10{,}38 + 2{,}54x10^{-3}T - 1{,}42x10^5T^{-2})}\\ &\quad 44{,}18 + 7{,}52x10^{-3}T - 7{,}20x10^5T^{-2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum C_p,\ react. &= 2C_p,\ ZnS + 3C_p,\ O_2\\ &= 2x(12{,}16 + 1{,}24x10^{-3}T - 1{,}36x10^5T^{-2})\\ &+ \underline{3x(7{,}16 + 1{,}00x10^{-3}T - 0{,}40x10^5T^{-2})}\ .\\ &\quad 45{,}8 + 5{,}48x10^{-3}T - 3{,}92x10^5T^{-2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta C_p &= 44{,}18 + 7{,}52x10^{-3}T - 7{,}20x10^5T^{-2}\\ &\ \ \underline{-45{,}80 - 5{,}48x10^{-3}T + 3{,}92x10^5T^{-2}}\\ &\ \ -1{,}62 + 2{,}04x10^{-3}T - 3{,}28x10^5T^{-2}\end{aligned}$$

$$\Delta H^{\circ}_{1100} = -211900 + \int_{298}^{1100}\left(-1{,}62 + 2{,}04x10^{-3}T - 3{,}28x10^5T^{-2}\right)dT$$

$$\Delta H^{\circ}_{1100} = -211900 - 1{,}62x(1100 - 298) + \frac{2{,}04x10^{-3}}{2}x(1100^2 - 298^2) + 3{,}28x10^5x\left(\frac{1}{1100} - \frac{1}{298}\right)$$

$= -212858$ cal.

$$\mathbf{\Delta H^{\circ}_{1100} = -212{,}86\ Kcal.}\ (32\text{-}1)$$

EJERCICIO N°33 (11)

PREGUNTAS

1. Encontrar una fórmula general para el calor de la siguiente reacción, en términos de temperatura:

$$ZnO + C = Zn + CO$$

Datos:

Para ZnO: $\Delta H^{\circ}_{298} = -83{,}2$ Kcal./mol.
$C_p = 11{,}71 + 1{,}22x10^{-3}T - 2{,}18x10^5T^{-2}$ cal./mol./grado

Para C: $C_p = 4{,}10 + 1{,}02x10^{-3}T - 2{,}10x10^5T^{-2}$ "

Para Zn: $C_p = 5{,}35 + 2{,}40x10^{-3}T$ "

Para CO: $\Delta H^{\circ}_{298} = -26{,}40$ Kcal./mol.
$C_p = 6{,}80 + 1{,}0x10^{-3}T - 0{,}11x10^5T^{-2}$ "

SOLUCION

1.

Utilizaremos la siguiente expresión:

$$\Delta H^\circ{}_T = \Delta H^\circ{}_{298} + \int_{298}^{T} \Delta C_p \cdot dT$$

$\Delta H^\circ_{298} = \Delta H^\circ_{298}, CO - \Delta H^\circ_{298}, ZnO$

$\Delta H^\circ_{298} = -26{,}4 + 83{,}2 = +56{,}8$ Kcal.

$\Delta C_p = \Sigma C_p$, prod. - ΣC_p, react.

$$\begin{aligned} \Sigma C_p\text{, prod.} &= C_p\text{, CO} + C_p\text{, Zn} \\ &= 6{,}80 + 1{,}0x10^{-3}T - 0{,}11x10^{5}T^{-2} \\ &+ \underline{5{,}35 + 2.40x10^{-3}T} \\ &\quad 12{,}15 + 3{,}4x10^{-3}T - 0{,}11x10^{5}T^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma C_p\text{, react.} &= C_p\text{, ZnO} + C_p\text{, C} \\ &= 11.71 + 1{,}22x10^{-3}T - 2{,}18x10^{5}T^{-2} \\ &+ \underline{4{,}10 + 1.02x10^{-3}T - 2{,}10x10^{5}T^{-2}} \\ &\quad 15{,}81 + 2{,}24x10^{-3}T - 4{,}18x10^{5}T^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta C_p &= 12{,}15 + 3{,}40x10^{-3}T - 0{,}11x10^{5}T^{-2} \\ &- \underline{15{,}81 - 2{,}24x10^{-3}T + 4{,}28x10^{5}T^{-2}} \\ &\quad -3{,}66 + 1{,}16x10^{-3}T + 4{,}17x10^{5}T \end{aligned}$$

$$\Delta H^\circ{}_T = 56800 + \int_{298}^{T} \left(-3{,}66 + 1{,}16x10^{-3}T + 4{,}17x10^{5}T^{-2}\right) \cdot dT$$

Resolviendo esta ecuación en términos de T, obtendremos la fórmula general para calcular el calor de la reacción planteada a cualquier temperatura.

$$\mathbf{\Delta H^\circ{}_T = 59238{,}5 - 3{,}66T + 0{,}58x10^{-3}T^2 - 4{,}17x10^{5}T^{-1}} \quad (33\text{-}1)$$

EJERCICIO N°34 (11)

En una investigación sobre las propiedades del α-manganeso, se determinaron los siguientes contenidos de calor:

$\Delta H^\circ_{700} - \Delta H^\circ_{298} = 2895$ cal./g.-atom.

$\Delta H^\circ_{1000} - \Delta H^\circ_{298} = 5450$ "

PREGUNTAS

1. Encontrar la ecuación adecuada para $[H^\circ_T - H^\circ_{298}]$ y también para C_p como una función de temperaturas, en la forma (a + bT). Asumir que no hay transformaciones estructurales en el rango de temperaturas dadas.

SOLUCION

1.

Primero haremos el cálculo determinativo de C_p:

$$2895 = \int_{298}^{700} (a + bT) \cdot dT \therefore$$

$$2895 = a \cdot (700 - 298) + \frac{b}{2} x(700^2 - 298^2) = 402 \cdot a + 200598 \cdot b$$

$$5450 = \int_{298}^{1000} (a + bT) \cdot dT \therefore$$

$$5450 = a \cdot (1000 - 298) + \frac{b}{2} x(1000^2 - 298^2) = 702 \cdot a + 455598 \cdot b$$

Se plantea el siguiente sistema de ecuaciones:

1) $2895 = 402 \cdot a + 200598 \cdot b$
2) $5450 = 702 \cdot a + 455598 \cdot b$

Al resolverlo encontramos que: $a = 5{,}330$ y $b = 0{,}00375$

La ecuación quedaría:

$$\mathbf{C_p = 5{,}330 + 3{,}75x10^{-3}T} \quad (34\text{-}1)$$

$$H^\circ_T - H^\circ_{298} = \int_{298}^{T} C_p \cdot dT$$

$$C_p = 5{,}330 + 3{,}75x10^{-3}T.$$

$$H^\circ_T - H^\circ_{298} = \int_{298}^{T} (5{,}330 + 3{,}75x10^{-3}T) \cdot dT$$

$$\mathbf{H^\circ_T - H^\circ_{298} = 5{,}330 \cdot (T - 298) + \frac{3{,}75x10^{-3}}{2}(T^2 - 298^2)\ cal./g.\text{-}atom.} \quad (34\text{-}1)$$

EJERCICIO N°35 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de vaporización de la plata líquida a 1000°C (1273K) y el calor de fusión de la plata sólida a 900°C (1173K).

Datos:

C_p, (Ag., s) = 5,0 cal./mol./grado.
C_p, (Ag., l) = 7,3 "
C_p, (Ag., g) = 5,0 "
Calor de fusión de Ag. A 961°C (1234K) = 2,69 Kcal./mol.
Calor de vaporización de Ag. A 2200°C (2473K) = 60 Kcal./ml.

SOLUCION

1.

Durante la fusión se efectúa la siguiente reacción:

$$Ag.(s) \rightarrow Ag.(l)$$

$$\Delta H_F = \lambda_F + \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_p; dT$$

ΔH_F = calor de fusión
T_1 = temperatura a la cual funde la plata en condiciones normales = 961°C = 1234K
T_2 = temperatura a la cual se va a fundir la plata = 900°C = 1173K.
λ_F = calor latente de fusión.

$\Delta C_p = C_p(l) - C_p(s) = 7,3 - 5 = 2,3$ cal./mol.K = 0,0023 Kcal/mol.K

Integrando:

$\Delta H_F = 2,69 + 0,0023x(1173 - 1234) = 2,597$ Kcal./mol.

Calor de fusión de la plata a 900°C = 2,597 Kcal./mol. (35-1)

Durante la vaporización, la reacción es:

$$Ag.(l) \rightarrow Ag.(g)$$

Siguiendo el mismo mecanismo que en el caso anterior:

$$\Delta H_V = 60 + \int_{2473}^{1273} \left(\frac{5 - 7,3}{1000} \right) dT = 62,76$$

Calor de vaporización de la plata a 1000°C = 62,76 Kcal./mol. (35-1)

EJERCICIO N°36 (11)

El ZnO puro es reducido por la cantidad estequiométrica de carbono en una retorta a 25°C. Los productos salen de la retorta a 907°C (1180K).

ZnO (s, 25°C) + C (grafito, 25°C) = Zn (g, 907°C, 1 atm.) + CO (g, 907°C, 1 atm.)

PREGUNTAS

1. Calcular la cantidad de calor, por kilogramo de zinc producido, que debe ser transmitido a la retorta para completar la reacción.

DATOS:

- Calores estándar de formación del ZnO y el CO a 25°C son – 83,2 y – 26,42 Kcal /mol, respectivamente.
- Calor del zinc en su punto de fusión (420°C) = 1.74 Kcal./mol.
- Calor de evaporación del zinc en su punto normal de ebullición (907°C) = 27,3 Kcal /mol.
- C_p, Zn = $5,35 + 2,40x10^{-3}T$ cal./mol.K (rango: 25°C a 420°C) y 7,75 cal./mol.K (rango: 420°C a 927°C).
- C_p, CO = $6,8 + 0,98x10^{-3}T$ cal./mol.K (rango: 25°C a 2227°C).
- Peso atómico del zinc = 65,38

SOLUCION

1.

Esta cantidad de calor se calcula así:

$$\Delta H^{o}_{1180} = \Delta H^{o}_{298} + n_{Zn}\int_{298}^{693} C_p, Zn(s)dT + nx1{,}74x1000 + n_{Zn}\int_{693}^{1180} C_p, Zn(l)dT + 27{,}3x1000 +$$

$$n_{CO}\int_{298}^{1180} C_p, CO.$$

$\Delta H^{o}_{298} = \Sigma H^{o}_{298}$, prod. - ΣH^{o}_{298}, react.

Estequiometría:

Para 1 Kg. de Zn = 1000 g. = 15,295 g. – mol:
ZnO = 15,295 g.-mol = CO = C(gr.)

$\Delta H^{o}_{298} = 15{,}295x(-26{,}42 + 83{,}2) = 868{,}734$ cal.

Para llevar el Zn desde 298K a 1180K, se necesitan:

$$\Delta H_{1180}, Zn = 15{,}295\int_{298}^{693}\left(5{,}35 + 2{,}40x10^{-3}T\right)dT + 15{,}295x1740 +$$

$$15{,}295\int_{693}^{1180} 7{,}75\cdot dT + 15{,}295x27300 = 541578\,\text{cal} = 541{,}578\,\text{Kcal.}$$

Para llevar el CO desde 298K hasta 1180K, se necesitan:

$$\Delta H_{1180}, CO = 15{,}295\int_{298}^{1180}\left(6{,}8 + 0{,}98x10^{-3}T - 0{,}11x10^{5}T^{-2}\right)dT =$$

$$101081\,\text{cal} = 101{,}081\,\text{Kcal.} \therefore$$

ΔH^{o}_{1180}, reacción = 868,734 + 541,578 + 101,081 = 1511,393 Kcal.

ΔH^{o}_{1180}, reacción = 1511,4 Kcal./Kg. de Zn. (36-1)

EJERCICIO N°37 (11)

1. Calcular el cambio de entalpía de la siguiente reacción a 1097°C (1370K):

$$Cu(l) + \tfrac{1}{2} Cl_2(g) = CuCl(l)$$

DATOS:

- Calor estándar de formación del CuCl a 25°C (298K) = - 32,2 Kcal./mol.
- Calores de fusión del Cu y CuCl = 3,1 y 2,45 Kcal./mol, respectivamente.
- Puntos de fusión del Cu y el CuCl = 1083°C (1356K) y 430°C (703K), respectivamente.
- C_p, Cu,s = 5,41 + 1,50x10^{-3}T (rango: 25°C a 1083°C) y Cu,l = 750 cal/mol.K (rango: 1083°C a 1327°C).
- C_p, CuCl,s = 5,87 + 19,20x10^{-3}T (rango: 25°C a 430°C) y CuCl,l = 15,80 cal./mol.K (rango: 430°C a 1097°C).
- C_p, Cl_2 = 8,82 + 0,06x10^{-3}T – 0,68x$10^{5}T^{-2}$ cal./mol.K (rango: 25°C a 2727°C).

SOLUCION

1.
Reacción:

$Cu(l) + \frac{1}{2} Cl_2(g) = CuCl(l)$

$$\Delta H^\circ_{1370K} = \Delta H^\circ_{298} + \int_{298}^{703} \Delta C^{I}{}_p dT + \Delta H_{F,CuCl} + \int_{703}^{1356} \Delta C_p{}^{II} + \Delta H_{F,Cu} + \int_{1356}^{1370} \Delta C_p{}^{III} dT$$

$\Delta H^\circ_{298} = -\ 32{,}2$ Kcal./mol.

$\Delta C_p = \sum C_p$, product. - $\sum C_p$, react.

$\Delta C_p{}^{I} = C_p$, CuCu(s) – ½ C_p, Cl_2 – C_p, Cu(s)
$\Delta C_p{}^{I} = -\ 3{,}95 + 17{,}67x10^{-3}T + 0{,}34x10^{5}T^{-2}$

$\Delta C_p{}^{II} = C_p$, CuCl(l) – ½ C_p, Cl_2 – C_p, Cu(s)
$\Delta C_p{}^{II} = 5{,}98 - 1{,}53x10^{-3}T + 0{,}34x10^{5}T^{-2}$

$\Delta C_p{}^{III} = C_p$, CuCl(l) – ½ C_p, Cl_2 – C_p, Cu(l)
$\Delta C_p{}^{III} = 3{,}89 - 0{,}03x10^{-3}T + 0{,}34x10^{5}T^{-2}$

$$\int_{298}^{703} \Delta C_p{}^{I} dT = \int_{298}^{703} \left(-3{,}95 + 17{,}67x10^{-3}T + 0{,}34x10^{5}T^{-2}\right) dT = 2048 \text{ cal/mol.}$$

$$\int_{703}^{1356} \Delta C_p{}^{II} = \int_{703}^{1356} \left(5{,}98 + 1{,}53x10^{-3}T + 0{,}34x10^{5}T^{-2}\right) dT = 2900 \text{ cal/mol}$$

$$\int_{1356}^{1370} \Delta C_p{}^{III} = \int_{1356}^{1370} \left(3{,}89 - 0{,}03x10^{-3}T + 0{,}34x10^{5}T^{-2}\right) dT = 54{,}14 \text{ cal/mol.}$$

Hay que tomar en cuenta que el CuCl funde antes que el Cu. Por tanto, sus calores latentes en la sumatoria llevan signo contrario por ser producto de estas reacciones:

1. Cu(s) + ½ Cl_2 = CuCl(s): ΔH_I
2. Cu(s) + ½ Cl_2 = CuCl(l): ΔH_{II}

En este caso, debido a que el CuCl se funde antes que el Cu, tendríamos:

1. CuCl(s) = ~~Cu(s) + ½ Cl₂~~: - ΔH_I
2. ~~Cu(s) + ½ Cl₂~~ = CuCl(l): + ΔH_{II}
3. CuCl(s) = CuCl(l): $\Delta H_{III} = \Delta H_{II} - \Delta H_I$

Cuando funde el Cu:

4. Cu(s) + ½ Cl_2 = CuCl(l): ΔH_{II}
5. Cu(l) + ½ Cl_2 = CuCl(l): ΔH_{IV}

Ordenando:

4. Cu(s) + ~~½ Cl₂~~ = ~~CuCl(l)~~: ΔH_{II}
5. ~~CuCl(l)~~ = Cu(l) + ~~½ Cl₂~~: - ΔH_{IV}
6. Cu(s) = Cu(l): $\Delta H_V = \Delta H_{II} - \Delta H_{IV}$

Termodinámicamente se comprende que: $\Delta H_I < \Delta H_{II} < \Delta H_{IV}$ ∴

ΔH_{III} = (+) y ΔH_V = (-), por tanto:

$\Delta H^\circ_{1370} = -\ 32{,}2 + 2{,}048 + 2{,}45 + 2{,}9 - 3{,}1 + 0{,}54 = -\ 27{,}848$

ΔH°_{1360} = - 27,848 Kcal. (37-1)

EJERCICIO N°38 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor requerido, por kilogramo, para elevar la temperatura de la chatarra de acero de 25°C (298K) a 1600°C (1873K); a partir de los siguientes datos para el hierro:

- El hierro realiza transformaciones en estado sólido a 760°, 910° y 1400°C (1033, 1183 y 1673K), con calores de formación de 326, 215 y 165 cal/mol, respectivamente.
- El punto de fusión del hierro es de 1537°C (1810K) y su calor de fusión es de 3670 cal./mol.
- Rangos de temperatura

Rangos de temperatura	C_p, Fe	
25 a 760°C	$3{,}0 + 7{,}58x10^{-3}T + 0{,}6x10^{5}T^{-2}$	cal./mol/K.
769 a 910°C	11,13	"
910 a 1400°C	$5{,}80 + 2{,}0x10^{-3}T$	"
1400 a 1537°C	$6{,}74 + 1{,}64x10^{-3}T$	"
1537 a 2700°C	$9{,}77 + 0{,}40x10^{-3}T$	"

- Peso atómico del hierro = 55,85

SOLUCION

1.

El cambio de entalpía para la chatarra (Fe.) en el rango de temperaturas entre 25°C (298K) y 1600°C (1873K), en el cual se realizan todos los cambios altrópicos del estado sólido al igual que la fusión del hierro como lo plantea el enunciado con sus datos, se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta H^{\circ}_{1873} = n_{Fe}\left[\int_{298}^{1033}\left(3{,}0 + 7{,}58x10^{-3}T + 0{,}6x10^{5}T^{-2}\right)dT + 326\right] +$$

$$n_{Fe}\left[\int_{1033}^{1183} 11{,}13\cdot dT + 215\right] +$$

$$n_{Fe}\left[\int_{1183}^{1673}\left(5{,}80 + 2{,}0x10^{-3}T\right)dT + 165\right] +$$

$$n_{Fe}\left[\int_{1673}^{1810}\left(6{,}74 + 1{,}64x10^{-3}T\right)dT + 3670\right] +$$

$$n_{Fe}\int_{1810}^{1873}\left(9{,}77 + 0{,}40x10^{-3}T\right)dT =$$

$$1/55{,}85\cdot(6056 + 326 + 1670 + 215 + 4241 + 165 + 1315 + 3670 + 662) = 328$$

ΔH°_{1873} = 328 Kcal./Kg. de Fe. (38-1)

EJERCICIO Nº39 (11)

Titanio (α) se transforma en titanio (β) a 882ºC (1155K), con un calor de transformación igual a 830 cal/mol.

PREGUNTAS

Calcular el calor de reacción cuando en titanio (β) es oxidado por oxígeno puro para formar TiO_2 a 1400ºC (1673K).

DATOS:

$Ti(\alpha) + \frac{1}{2} O_2 = TiO_2$: $\Delta H^o_{298} = -225,5$ Kcal./mol.
C_p, $Ti(\alpha) = 5,28 + 2,4x10^{-3}T$ cal./mol./K
C_p, $Ti(\beta) = 6,91$ "
C_p, $TiO_2 = 18,0 + 0,28x10^{-3}T - 4,35x10^5T^{-2}$ "
C_p, $O_2 = 7,16 + 1,0x10^{-3}T - 0,4x10^5T^{-2}$ "

SOLUCION

1.
La reacción sería:

$$Ti(\beta) + \frac{1}{2} O_2(g) = TiO_2(s)$$

El cálculo del calor de esta reacción se haría mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta H^o_{1673} = \Delta H^o_{298} + \int_{298}^{1155} \Delta C_p^{\,I} dT + 830 + \int_{1155}^{1673} \Delta C_p^{\,II} dT$$

$\Delta C_p^{\,I} = C_p, TiO_2 - C_p, Ti(\alpha) - C_p, O_2 = 5,56 - 3,12x10^{-3}T - 3,95x10^5T^{-2}$

$\Delta C_p^{\,II} = C_p, TiO_2 - C_p, Ti(\beta) - C_p, O_2 = 3,93 - 0,72x10^{-3}T - 3,95x10^5T^{-2}$

Integrando:

$$\int_{298}^{1155} \Delta C_p^{\,I} dT = 1839 \text{ cal./mol}$$

$$\int_{1155}^{1673} \Delta C_p^{\,II} dT = 1402,5 \text{ cal./mol}$$

$\Delta H^o_{1673} = -225,5 + 1839/1000 + 830/1000 + 1402,5/1000 = -221,43$

$\Delta H^o_{1673} = -221,43$ Kcal./mol. (39-1)

EJERCICIO N°40 (9)

5000 pies cúbicos por minuto de un gas cuyo análisis es: 80%N_2, 15%CO_2 y 5%H_2O han de ser enfriados desde 1400°F hasta 600°F por un aspersor de agua, instalado dentro del conducto de gas caliente.

El agua se introduce a 60°F y toda se evapora en la corriente principal del gas.

PREGUNTAS

1. El requerimiento de agua, en galones por minuto.
2. El porcentaje de humedad en el gas enfriado.

SOLUCION

1.

Vamos a calcular el contenido de calor de los gases a diferentes temperaturas:

Gas:

N_2 = 5000x0,8 = 4000 ft^3/min.
CO_2 = 5000x0,15 = 750 ft^3/min.
H_2O = 5000x0,05 = 250 ft^3/min.

1 libra – mol de gas ocupa 359 ft^3:

N_2 = 4000/359 = 11,142 lb. – mol
CO_2 = 750/359 = 2,089 lb – mol.
H_2O = 250/359 = 0,696 lb – mol.

Contenido de calor en el gas a 1400°F:

$H_t - H_{77}$ = BTU/lb – mol.:

Para el N_2 = 11,142x9720 = 108300 BTU
CO_2 = 2,089x15200 = 31753 BTU
H_2O = 0,696x11800 = 8213 BTU
Total contenido de calor a 1400°F = 148266 BTU

Contenido de calor del gas a 600°F:

Para el N_2 = 11,142x3680 = 41003 BTU
CO_2 = 2,089x5340 = 11155 BTU
H_2O = 0,696x4340 = 3021 BTU
Total contenido de calor a 600°F = 55179 BTU

Calor perdido por el gas, al pasar de 1400°F a 600°F = 148266 – 55179 = 93087 BTU/min.

Sea X = peso del agua asperjada (libras).

A 600°F, el calor de esta agua es = (X/18)x4340 = 241,111X (BTU)

Calor específico medio del agua líquida = 1,0 BTU/lb.°F

Contenido de calor del agua a 60°F = X x 1 x 60 = 60X (BTU/lb.)

Calor de evaporación del agua = 586 Kcal./Kg.

1 BTU = 252,0 cal = 0,252 Kcal.

Calor de evaporación del H_2O = 586·(~~Kcal/Kg.~~) x (BTU/0,252 ~~Kcal.~~) x (0,4536 ~~Kg.~~/1 lb) =
= 1054,8 BTU/lb.

Se supone que el calor de evaporación, ya está incluido en el valor de $H_{600} - H_{77}$.

Calor ganado por el agua al pasar de 60°F a 600°F = 241,111X + 60X = 301,111X (BTU/lb.)

Este mismo calor fue el que perdió el gas, por tanto:
301,111X (BTU/lb) = 93087 BTU/min. ∴

X = 93087/301,111 = 309,145 lb/min.

1 ft^3 = 7,48 galones.

H_2O = 209,145 (~~lb.~~/min) x (1 ~~mol~~/18 ~~lb.~~) x (359 ~~ft³~~/1 ~~mol~~) x (7,48 galones/~~1 ft³~~)
= 46120 galones/min.

Requerimiento de agua = 46120 galones / min. (40-1)

2.
El gas enfriado ahora es:

N_2	= 4000 ft^3
CO_2	= 750 ft^3
H_2O = 250 + 309,145·(359/18)	= 6416 ft^3
Total gas	= 11166 ft^3

H_2O = 6416/11166 = 0,5746

H_2O en gas enfriado = 57,46% (40-2)

EJERCICIO N°41 (9)

ZnO y C (gr.), en cantidades estequiometricamente equivalentes, se cargan en frío (77°F) dentro de una retorta y se calientan a 2400°F.

Se produce la reacción siguiente, saliendo de la retorta vapores de zinc y CO:

$$ZnO + C\ (gr.) \rightarrow Zn + CO$$

PREGUNTAS

1. La cantidad de calor requerido para llevar los reactantes a 2400°F, en BTU por libra de zinc.

2. La cantidad de calor a suministrar a la retorta a 2400°F para efectuar la reacción.

SOLUCION

1.
Cálculos estequiométricos:

Zn = 1 libra = 1/65,4 = 0,0153 lb-mol.
ZnO = 1x(81,4/65,4) = 1,245 lbs. = 0,0153 lb-mol
C = 1x(12/65,4) = 0,1835 lbs. = 0,0153 lb-mol.
CO = 1x(28/65,4) = 0,428 lbs. = 0,0153 lb-mol.

Las tablas (9) traen los valores para $H_t - H_{77}$ en BTU/lb-mol:

$H_{2400} - H_{77}$:
Para ZnO = 28800x0,0153 = 440,64
C (gr.) = 0,0153x10800 = 165,24

Calor requerido = 440,64 + 165,24 = 605,88
Calor requerido para elevar los reactantes a 2400°F = 605,88 BTU/lb. de Zn (41-1)

2.
Calores de formación:
ZnO = 83,17x1800 = - 149706 BTU/lb-mol
CO = 26,42x1800 = - 47756 "

ΔH, reacción = 0,0153x(- 47756 + 149706) = 1560 BTU/lb. de Zn.

Calor a suministrar = 1560 + 606 = 2166

Calor a suministrar a la retorta para realizar la reacción = 2166 BTU/lb. de Zn. (41-2)

CAPITULO VII

EL ALTO HORNO

EJERCICIO Nº1 (7)

Un mineral de hierro es reducido en un alto horno de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Fe_2O_3 + 9CO = 2Fe + 3CO_2 + 6CO$$

El CO necesario es obtenido por la combustión del coque en el fondo del horno. El coque contiene 90%C, del cuál el 4% es absorbido por el hierro reducido y el 86% es quemado a CO; no se forma CO_2 en la combustión.

PREGUNTAS

1. El volumen de CO necesario para reducir una tonelada métrica de hierro, tal como es requerido por la ecuación.
2. El peso teórico de coque requerido para reducir una tonelada métrica de hierro.
3. El volumen de aire utilizado en quemar esta cantidad de coque.
4. El volumen y composición, (%), de los gases formados en la combustión.
5. El volumen y composición, (%), de los gases resultantes de la combustión, más los que resultan de la reducción.
6. El volumen de aire utilizado por tonelada de coque, medido a 600ºC y 1800 mm de presión total.

SOLUCION

1.
Fe = 1000 Kg.

$$CO = 1000\cdot(9x22,4/2x56) = 1800\ m^3$$

CO necesario = 1800 m^3/ton. de Fe. (1-1)

2.
C en CO = 1800·(12/22,4) = 964,3 Kg.
Coque = 964,3/0,86 = 1121,3 Kg.

Coque = 1121,3 Kg./ton. de Fe. (1-2)

3.
$$C + ½\,O_2 \rightarrow CO$$

O_2 = 1800/2 = 900 m^3
Aire = 900/0,21 = 4285,7 m^3

Aire = 4285,7 m^3 (1-3)

4.
Gases P.C = CO + N_2

Volumen y composición de los gases P.C. (1-4)

CO	= 1800,0 m^3 =	34,7%
N_2 = 4285,7 – 900 =	3385,6 m^3 =	65,3%
Gas total	= 5185,7 m^3	100,0%

5.
Gases P.C + reducción = N_2 + CO + CO_2

Volumen y composición de estos gases: (1-5)

N_2	$= 3385{,}7\ m^3$	$= 64{,}3\%$
$CO = 1800\cdot(6/9)$	$= 1200{,}0\ m^3$	$= 23{,}1\%$
$CO_2 = 1800\cdot(3/9)$	$= 600{,}0\ m^3$	$= 11{,}6\%$
Total gases	$= 5185{,}7\ m^3$	$100{,}0\%$

6.
Coque = 1000 Kg.

$C \rightarrow CO = 1000 x 0{,}86 = 860$ Kg.

$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$

$O_2 = 860\cdot(22{,}4/24) = 803\ m^3$
Aire a C.N $= 803/0{,}21 = 3824\ m^3$

Cambio de condiciones:

$P_1 = 760$ mm	$P_2 = 1800$ mm
$T_1 = 273K$	$T_2 = 600 + 273 = 873K$
$V_1 = 3824\ m^3$	$V_2 = ?$

$V_2 = V_1 x (P_1/T_1) x (T_2 P_2) = 5163\ m^3$

Aire a C.D = 5163 m^3/ton. de coque. (1-6)

EJERCICIO Nº2 (7)

Un alto horno produce un arrabio que contiene:

C	3,6%
Si	1,4
Fe	95,0

El mineral contenía:

Fe_2O_3	80%
SiO_2	12
Al_2O_3	8

El coque (1 kilogramo por kilogramo de arrabio), contenía:

SiO_2	10%
C	90

El fundente (0,40 kilogramos por kilogramo de arrabio) era $CaCO_3$ puro.
El gas contenía 28%CO y 12%CO_2.

PREGUNTAS

Por tonelada de arrabio producido:

1. El peso del mineral utilizado.
2. El peso de la escoria producida.
3. El volumen del gas del alto horno.

SOLUCION

1.
Peso de Fe en arrabio = Peso de Fe en mineral

Fe en arrabio = 1000x0,95 = 950 Kg.
Fe en mineral = 80·(112/160) = 56%
Mineral = 950/0,56 = 1696 Kg.

Peso del mineral = 1696 Kg./ton. de arrabio (2-1)

2.
Escoria = $SiO_2 + CaO + Al_2O_3$:

SiO_2 en mineral = 1696x0,12 = 203,4 Kg.
SiO_2 en coque = 1000x0,1 = 100,0 Kg.
Total SiO_2 cargado = 203,4 + 100 = 303,4 Kg.
Si en arrabio = 1000x0,014 = 14 Kg.
SiO_2 reducida = 14·(60/28) = 30 Kg.
SiO_2 en escoria = 303,4 – 30 = 273,4 Kg.

$CaCO_3$ cargada = 1000x0,4 = 400 Kg.
CaO de esta = 400·(56/100) = 224 Kg.

Al_2O_3 = 1696x0,08 = 135,6 Kg.

Escoria = 273,4 + 135,6 + 224 = 633 kg.

Escoria producida = 633 Kg./ton. de arrabio (2-2)

3.
Gas producido = $N_2 + CO + CO_2$

Para el cálculo del volumen del gas, utilicemos la siguiente expresión:

$$\text{Volumen del gas} = \frac{\text{C total en gas}}{\text{C}/\text{m}^3\text{ de gas}} \qquad (1)$$

C total en gas = C en coque + C en $CaCO_3$ – C en arrabio:

C en coque = 1000x0,9 = 900 Kg.
C en $CaCO_3$ = 400·(12/100) = 48 Kg.
C en arrabio = 1000x0,036 = 36 Kg.
C total en gas = 900 + 48 – 36 = 912 Kg.

Supongamos 1 m^3 de gas:

C en CO = 1x0,28 = 0,28
C en CO_2 = 1x0,12 = 0,12
0,40
C en gas = 0,40·(12/22,4) = 0,214 Kg./m^3 de gas.

Gas = 912 Kg./0,214 (Kg./m^3) = 4262 m^3

Volumen del gas = 4262 m^3 (2-3)

EJERCICIO N°3 (7)

Un alto horno utiliza mineral y produce un arrabio de la siguiente composición:

Mineral		Arrabio	
Fe_2O_3	84%	Fe	94,0%
SiO_2	9	Si	2,2
Al_2O_3	3	C	3,8
H_2O	4		

El fundente (50 libras por 100 libras de arrabio) es:

$CaCO_3$	95%
SiO_2	5

El coque (90 libras por 100 libras de arrabio) es:

C	84%
SiO_2	10
Al_2O_3	3
H_2O	3

El análisis de los gases (secos):

CO	27%
CO_2	14
N_2	59

Asumir que no hay hierro en la escoria.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral fundido, por tonelada corta de arrabio.
2. El peso de escoria producida, por tonelada de arrabio.
3. El volumen de los gases del alto horno (incluyendo la humedad), por tonelada de arrabio.
4. El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas.

SOLUCION

1.
1 tonelada corta = 2000 libras.

Peso del Fe en mineral = peso del Fe en arrabio.

Fe en arrabio = 2000x0,94 = 1880 lbs.
Fe en mineral = 84·(112/160) = 58,8%

Mineral = 1880/0,588 = 3197,3 lbs.

Peso del mineral = 3197,3 libras (3-1)

2.
Escoria = SiO_2 + Al_2O_3 + CaO

SiO_2 en mineral = 3197,3x0,09 = 288 lbs.
Fundente = 2000·(50/100) = 1000 lbs.
SiO_2 en este = 1000x0,05 = 50 lbs.
Coque = 2000·(90/100) = 1800 lbs.
SiO_2 en coque = 1800x0,1 = 180 lbs.
Si en arrabio = 2000x0,022 = 44 lbs.

SiO_2 reducido = 44·(60/28) = 94 lbs.
SiO_2 en escoria = 288 + 50 + 180 – 94 = 424 lbs.

Al_2O_3 en mineral = 0,03x3197,3 = 96 lbs.
Al_2O_3 en coque = 0,03x1800 = 54 lbs.
Al_2O_3 en escoria = 96 + 54 = 150 lbs.

$CaCO_3$ = 1000x0,95 = 950 lbs.
CaO de este = 950·(56/100) = 532 lbs.

Escoria = 424 + 150 + 532 = 1106 lbs.

Peso de la escoria = 1106 lbs. (3-2)

3.
Para el cálculo de los gases secos, utilizamos la ecuación (1):

C total en gas = C en coque + C en $CaCO_3$ – C en arrabio:
C en coque = 1800x0,84 = 1512 lbs.
C en $CaCO_3$ = 950·(12/100) = 114 lbs.
C en arrabio = 2000x0,038 = 76 lbs.
C total en gas = 1512 + 114 – 76 = 1550 lbs.

Asumimos 1 ft^3 de gas seco:
C en CO = 1x0,27 = 0,27
C en CO_2 = 1x0,14 = $\underline{0,14}$
0,41
C en gas seco = 0,41·(12/359) = 0,0137 lbs./ft^3

Gas seco = 1550 lbs / 0,0137·(lbs/ft^3) = 113139 ft^3

Cálculo de la humedad:
H_2O en mineral = 0,04x3197,3 = 128 lbs.
H_2O en mineral = 128·(359/18) = 2553 ft^3
H_2O en coque = 0,03x1800 = 54 lbs.
H_2O en coque = 54·(359/18) = 1077 ft^3
Total H_2= en gas = 2553 + 1077 = 3630 ft^3

Gas total = 113139 + 3630 = 116769 ft^3

Gas húmedo = 116769 ft^3 (3-3)

4.
N_2 en gas = 113169x0,59 = 66752 ft^3
O_2 del aire = 66752·(21/79) = 17744 ft^3

En las toberas ocurre la siguiente reacción:

$2C + O_2 = 2CO$

C = 17744·(2x12/359) = 1186 lbs.
C = 1186/1512 = 0,784

C de coque quemado en las toberas = 78,4% (3-4)

EJERCICIO N°4 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composición:

Fe	93,6%
Si	2,1
C	3,6
Mn	0,7

El mineral utilizado analizó lo siguiente:

Fe_2O_3	78%
SiO_2	9
Al_2O_3	5
MnO	1
H_2O	7

Asumir que todo el Fe_2O_3 es reducido a Fe.

El coque contiene 90%C y 10%SiO_2, y se utiliza una tonelada por tonelada de arrabio producido.

El fundente es $CaCO_3$ puro, y se utilizó el suficiente como para producir una escoria con 45%CaO.

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de mineral utilizado por tonelada de arrabio producido.
2. Los porcentajes de los totales de SiO_2 y MnO que son reducidos en el horno.
3. El peso de la escoria producida por tonelada de arrabio, y su composición (%).

SOLUCION

1.

Peso de Fe en arrabio = Peso de Fe en mineral:

Fe en arrabio = 1000x0,936 = 936 Kg.

Fe en mineral = Fe en Fe_2O_3 = 78·(112/160) = 54,6% ∴

Mineral = 936/0,546 = 1714 Kg.

Peso del mineral utilizado = 1714 Kg. (4-1)

2.

SiO_2 en mineral = 1714x0,09 = 154,26 Kg.

SiO_2 en coque = 1000x0,1 = 100,00 Kg.

SiO_2 total cargado = 254,26 Kg.

Si en arrabio = 1000x0,021 = 21 Kg.

SiO_2 reducido = 12·(60/28) = 45 Kg.

SiO_2 reducido = 45/254,26 = 0,177

SiO_2 reducido = 17,7% del total (4-2)

MnO en mineral = 1714x0,01 = 17,14 Kg.

Mn en arrabio = 1000x0,007 = 7 Kg.

MnO reducido = 7·(71/55) = 9,04 Kg.

MnO reducido = 9,04/17,14 = 0,527

MnO reducido = 52,7% del total (4-2)

3.

Escoria = SiO_2 + MnO + Al_2O_3 + CaO.

SiO_2 en escoria = 254,26 – 45 = 209,26 Kg.
MnO en escoria = 17,14 – 9,04 = 8,10 Kg.
Al_2O_3 en escoria = 1714x0,05 = 85,70 Kg.
Total escoria sin CaO = 303,06 Kg.
Total escoria sin CaO = 100 – 45 = 55%
Peso de la escoria = 303,06/0,55 = 551 Kg.

Peso de la escoria = 551 Kg. (4-3)

Composición de la escoria (4-3)

SiO_2 = (209,26/551)x100 = 37,98%
MnO = (8,1/551)x100 = 1,47%
Al_2O_3 = (85,7/551)x100 = 15,55%
CaO = 45,00%
100,00%

EJERCICIO N°5 (7)

El mineral de hierro utilizado en un alto horno, tenía la siguiente composición:

Fe_2O_3	82%
SiO_2	14
Al_2O_3	2
H_2O	2

Se cargaron 0,22 libras de $CaCO_3$ por cada libra de mineral.

Se cargó una libra de coque por cada libra de arrabio producido y contenía 90%C y 10% de residuos (R).

El horno produjo por día 600 toneladas largas de arrabio, en cual contenía 94%Fe; 4%C y 2%Si.

El análisis del gas del alto horno mostró una proporción de CO a CO_2 igual a 3:2, análisis seco.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral cargado, por día.
2. El volumen del gas producido, por tonelada de arrabio.
3. El volumen y el peso del soplo, por tonelada de arrabio.
4. El peso del carbono quemado en las toberas, por tonelada de arabio.

SOLUCION

1.
1 tonelada larga = 2240 libras.

Peso del Fe en arrabio = peso del Fe en mineral

Fe en arrabio = 600x0,84 = 564 ton.
Fe en Fe_2O_3 = Fe en mineral = 82·(112/160) = 57,4%
Mineral = 564/0,574 = 983 ton.

Peso del mineral cargado = 983 ton./día. (5-1)

2.
Arrabio = 1 tonelada larga = 2240 libras.
C en coque = 2240x0,9 = 2016 lbs.
Mineral cargado por tonelada de arrabio = 2240·(983/600) = 3670 libras.

$CaCO_3$ = 3670x0,22 = 817,18 lbs.
C en $CaCO_3$ = 817,18·(12/100) = 98 lbs.
C en arrabio = 2240x0,04 = 89,60 lbs.
$C \rightarrow$ gas = 2016 + 98 – 90 = 2024 lbs.
$C \rightarrow CO$ = 2024·(3/5) = 1214,4 lbs.
$C \rightarrow CO_2$ = 2024 – 1214,4 = 809,6 lbs.

O_2 en CO = 1214,4·(16/12) = 1619 lbs.
O_2 en CO_2 = 809,6·(32/12) = 2159 lbs.
Total O_2 en gas = 3778 lbs.

Fe_2O_3 = 3670x0,82 = 3009 lbs.
O que aporta el Fe_2O_3 al gas = 3009·(48/160) = 902,7 lbs.

Si en arrabio = 2240x0,02 = 44,8 lbs.
O del Si = 44,8·(32/28) = 51,2 lbs.

O en $CaCO_3$ = 817,18·(48/100) = 392,25 lbs.
CaO = 817,18·(52/12) = 424,88 lbs.
O en CaO = 424,88·(16/52) = 131 lbs.
O que aporta el $CaCO_3$ al gas = 392 – 131 = 261 lbs.

O de reducción = 902,7 + 51,2 + 261 = 1215 lbs.

O del aire = 3778 – 1215 = 2563 lbs.
O_2 del aire = 2563·(359/32) = 28754 ft^3

Cálculo del gas:
N_2 = 28754·(79/21) = 108170 ft^3
CO = 1214,4·(359/12) = 36331 ft^3
CO_2 = 809,6·(359/12) = 24220 ft^3
H_2O = 3670x0,02·(359/18) = 1464 ft^3
Gas = 170185 ft^3

Volumen del gas = 170185 ft^3/ton. de arrabio (5-2)

3.
Aire (soplo) = 108170 + 28754 = 136924 ft^3
Volumen del soplo = 136924 ft^3 (5-3)

Peso del soplo = 2563/0,232 = 11047 lbs.
Peso del soplo = 11047 libras (5-3)

4.
El toberas:

$2C + O_2 \rightarrow 2CO$

C = 2563·(24/32) = 1922 lbs.
C quemado en toberas = 1922 libras (5-4)

EJERCICIO N°6 (7)

Un mineral de hierro presenta la siguiente composición:

Fe_2O_3	76%
SiO_2	14
MnO	1
Al_2O_3	9

Este mineral es fundido en un alto horno, produciendo un arrabio de la siguiente composición:

Fe	94,2%
C	3,5
Si	1,5
Mn	0,8

Por tonelada de arrabio producido, se utilizaron 1100 kilogramos de coque con el siguiente análisis: 88%C y 12%SiO_2.

El análisis de los gases del horno fue el siguiente: 26%CO, 13%CO_2 y 61%N_2.

Asumir que no pasó hierro a la escoria.

PREGUNTAS

1. El peso de mineral necesario para producir una tonelada de arrabio.
2. El peso de la piedra caliza ($CaCO_3$ pura), por tonelada de arrabio, necesaria para producir una escoria con 36%CaO.
3. El volumen de los gases del horno, por tonelada de arrabio.
4. El volumen del soplo, calculado por el método del nitrógeno y también por el del oxígeno.

SOLUCION

1.

Peso del Fe en arrabio = Peso del Fe en mineral:

Fe en arrabio = 1000x0,942 = 942 Kg.
Fe en mineral = Fe en Fe_2O_3 = 76·(112/160) = 53,2%
Mineral = 942/0,532 = 1770 Kg.

Peso del mineral = 1770 Kg./ton. de arrabio (6-1)

2.

Para realizar este cálculo es preciso primero determinar la escoria, para a partir de ella calcular el CaO y a continuación al $CaCO_3$:

Escoria = SiO_2 + MnO + Al_2O_3 + CaO:

SiO_2 en mineral = 1770x0,14 = 247,8 Kg.
SiO_2 en coque = 1100x0,12 = <u>132,0 Kg.</u>
Total SiO_2 cargado = 379,8 Kg.
Si en arrabio = 1000x0,015 = 15 Kg.
SiO_2 reducido = 15·(60/28) = 32,1 Kg.
SiO_2 → escoria = 379,8 – 32,1 = 347,7 Kg.

MnO cargado = 1770x0,01 = 17,7 Kg.
Mn arrabio = 1000x0,008 = 8 Kg.
MnO reducido = 8·(71/55) = 10,34 Kg.
MnO → escoria = 17,7 – 10,34 = 7,36 Kg.

$Al_2O_3 \rightarrow$ escoria = 1770x0,09 = 159,30 Kg.

Escoria sin CaO = 347,7 + 7,36 + 159,30 = 514,36 Kg.
Escoria sin CaO = 100 – 36 = 64% ∴
Total escoria = 514,36 / 0,64 = 803 Kg.
CaO = 803 – 514 = 289 Kg.

$CaCO_3$ = 289·(100/56) = 516 Kg.

Peso de la piedra caliza ($CaCO_3$) = 516 Kg. (6-2)

3.
Para este cálculo vamos a utilizar la ecuación (1):

C en coque = 1100x0,88 = 968 Kg.
C en $CaCO_3$ = 516·(12/100) = 62 Kg.
C total cargado = 1030 Kg.
C en arrabio = 1000x0,035 = 35 Kg.
C total en gas = 1030 – 35 = 995 Kg.

Asumamos 1 m^3 de gas y calculemos la cantidad de C que contiene:

C en CO = 1x0,26 = 0,26
C en CO_2 = 1x0,13 = 0,13
0,39
C en gas = 0,39·(12/22,4) = 0,209 Kg./m^3 de gas.

Gas = 995 Kg./0,209 (Kg./m^3 = 4760 m^3

Volumen del gas = 4760 m^3/ton. de arrabio (6-3)

4.
Método del nitrógeno:

N_2 en gas = 4760x0,61 = 2903,6 m^3
Soplo = 2903,6/0,79 = 3675 m^3

Volumen del soplo = 3675 m^3 (6-4)

Método del oxígeno:

O_2 del soplo = O_2 en gases – O_2 aportado por la carga.

O aportado por el SiO_2 reducido = 32,1 + 15 = 17,1 Kg.
O aportado por el MnO reducido = 10,34 – 8 = 2,34 Kg.
Fe_2O_3 = 1770+0,76 = 1345,20 Kg.
O aportado por el Fe_2O_3 reducido = 1345,2x(48/160) = 403.56 Kg.
O del $CaCO_3$ = 516·(48/100) = 247,68
O del CaO = 289·(16/56) = 82,5 Kg.
O aportado por $CaCO_3$ = 247,68 – 82,5 = 165,18 Kg.

O aportado por la carga = 17,1 + 2,34 + 403,56 + 165,18 = 588,18 Kg.
O_2 aportado por la carga = 588,18·(22,4/32) = 412 m^3

CO = 4760x0,26 = 1237,60 m^3
C + ½ O_2 = CO ∴
O_2 = 1237,6/2 = 618,8 m^3

CO_2 = 4760x0,13 = 618,8 m^3
C + O_2 = CO_2 ∴
O_2 = 618,8 m^3

Total O_2 en gas = 618,8 + 618,8 = 1237,6 m^3

O_2 del aire = 1237,6 – 412 = 825,6 m^3

Soplo = 825,6/0,21 = 3931 m^3

Volumen del soplo = 3931 m^3 (6-4)

EJERCICIO N°7 (7)

El mineral tratado en un alto horno contenía lo siguiente:

Fe_2O_3	75,4%	Al_2O_3	4,0%
MnO	2,6	P_2O_5	1,1
SiO_2	11,0	H_2O	5,9

La composición del coque era: 88%C, 8%SiO_2, 2%FeS y 2%H_2O

Se utilizó un fundente que contenía: 96%$CaCO_3$ y 4%SiO_2.

La cantidad de coque utilizada fue de 910 kilogramos por tonelada de arrabio, y el fundente cargado fue de 330 kilogramos por tonelada de arrabio producido.

El análisis del arrabio producido fue el siguiente:

C	3,8%	P	0,7%
Si	1,2	S	0,2
Mn	0,9	Fe	93,2

99% del hierro en Fe_2O_3 fue reducido y 1% escorificado. El azufre que no entra al arrabio, pasa a la escoria como CaS.

Los gases contenían 1 ¾ partes de CO a 1 parte de CO_2, por volumen.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral requerido, por 1000 kilogramos de arrabio.
2. El peso de la escoria producida.
3. Los porcentajes de SiO_2, MnO y P_2O_5 que fueron reducidos en el horno.
4. El volumen del gas de alto horno, por 1000 kilogramos de arrabio.

SOLUCION

1.

Fe del mineral = Fe en arrabio – Fe en FeS del coque.

Fe en arrabio = 1000x0,932 = 932 Kg.

FeS en coque = 910x0,02 = 18,2 Kg.
Fe en FeS = 18,2·(56/88) = 11,6 Kg.

Fe del Fe_2O_3 que va al arrabio = 932 – 11,6 = 920,4 Kg.
Total Fe en mineral = 920,4/0,99 = 929,7 Kg
Fe en mineral (Fe_2O_3) = 75,4·(112/160) = 52,78%

Mineral = 929,7/0,5278 = 1762 Kg.

Peso del mineral requerido = 1762 Kg. (7-1)

2.

Escoria = FeO + SiO_2 + MnO + Al_2O_3 + P_2O_5 + CaS + CaO:

Fe → FeO = 929,7 – 920,4 = 9,3 Kg.
FeO en escoria = 9,3·(72/56) = 12 Kg.

SiO_2 en mineral = 1762x0,11 = 193,82 Kg.
SiO_2 en coque = 910x0,08 = 72,80 Kg.
SiO_2 en fundente = 330x0,04 = 13,20 Kg.
Total SiO_2 cargado = 279,82 Kg.
Si en arrabio = 1000x0,012 = 12 Kg.
SiO_2 reducido = 12·(60/28) = 25,7 Kg.
SiO_2 en escoria = 279,82 – 25,7 = 254,12 Kg.

MnO en mineral = 1762x0,026 = 45,81 Kg.
Mn en arrabio = 1000x0,009 = 9 Kg.
MnO reducido = 9·(71/55) = 11,6 Kg.
MnO en escoria = 45,81 – 11,6 = 34,21 Kg.

Al_2O_3 en escoria = 1762x0,04 = 70,48 Kg.

P_2O_5 en mineral = 1762x0,011 = 19,38 Kg.
P en arrabio = 1000x0,007 = 7 Kg.
P_2O_5 reducido = 7·(142/62) = 16 Kg.
P_2O_5 en escoria = 19,38 – 16 = 3,38 Kg.

S en FeS = 18,2 – 11,6 = 6,6 Kg.
S en arrabio = 1000x0,002 = 2 Kg.
S → CaS = 6,6 – 2 = 4,6 Kg.
CaS en escoria = 4,6·(72/32) = 10,35 Kg.

Ca en CaS = 10,35 – 4,6 = 5,75 Kg.
$CaCO_3$ = 330x0,96 = 316,8 Kg.
Ca en $CaCO_3$ = 316,8·(40/100) = 126,72 Kg.
Ca → CaO = 126,72 – 5,75 = 120,97 Kg.
CaO = 120,97·(56/40) = 169,5 Kg.

Escoria = 12 + 254,12 + 34,21 + 70,48 + 3,38 + 10,35 + 169,5 = 554,04 Kg.

Peso de la escoria producida = 554 Kg. (7-2)

3.
SiO_2 reducido = 25,7/279,82 = 0,092 **SiO_2 reducido en el horno = 9,2%** (7-3)

MnO reducido = 11,6/45,81 = 0,253 **MnO reducido en el horno = 25,3%** (7-3)

P_2O_5 reducido = 16/19,38 = 0,826 **P_2O_5 reducido en el horno = 82,6%** (7-3)

4.
Gas = N_2 + CO + CO_2 + H_2O

C en coque = 910x0,88 = 800,8 Kg.
C en $CaCO_3$ = 316,8·(12/100) = 38,016 Kg.
C en arrabio = 1000x0,038 = 38 Kg.
C → gas = 800,8 + 38 – 38 = 800,8 Kg.

Vamos a la relación; CO:CO_2 = 1,75:1

C → CO = 800,8x(1,75/2,75) = 509,6 Kg.
C → CO_2 = 800,8 – 509,6 = 291,2 Kg.

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$
O_2 del CO = 509,6·(22,4/24) = 476 m^3

$C + O_2 = CO_2$
O_2 del CO_2 = 291,2·(22,4/12) = 544 m^3

Total O_2 en gas = 476 + 544 = 1020 m^3

O aportado por Fe_2O_3 = 920,4·(48/112) = 395 Kg.
O aportado por MnO = 11,6 – 9 = 2,6 Kg.
O aportado por SiO_2 = 25,7 – 12 = 13,7 Kg.
O aportado por P_2O_5 = 16 – 7 = 9
O en $CaCO_3$ = 316,8 – 38 – 126,72 = 152,08 Kg.
O en CaO = 169,5 – 120,97 = 48,53 Kg.
O aportado por $CaCO_3$ = 152,08 – 48,53 = 103,55 Kg.

O total de reducciones = 395 + 2,6 + 13,7 + 9 + 103,55 = 523,85 Kg.
O_2 total de reducciones = 523,85·(22,4/32) = 367 m^3

O_2 del aire = 1020 – 367 = 653 m^3

N_2 = 653·(79/21) = 2457 m^3

H_2O en mineral = 0,059x1762 = 104,0 Kg.
H_2O del coque = 910x0,02 = 18,2 Kg.
Total H_2O = 122,2 Kg.
Total H_2O = 122·(22,4/18) = 152 m^3

CO = 476x2 = 952 m^3
CO_2 = 544 m^3

Gas = 2457 + 152 + 952 + 544 = 4105 m^3

Volumen del gas del alto horno = 4105 m^3 (7-4)

EJERCICIO N°8 (7)

Un alto horno utiliza mineral de la siguiente composición:

Fe_2O_3 90% SiO_2 10%

Se utilizó un coque que contenía: 90%C y 10%SiO_2. El fundente fue piedra caliza con: 95%$CaCO_3$, 3%$MgCO_3$ y 2%SiO_2.

Se utilizó una tonelada de coque por tonelada de arrabio producido, el cual contenía: 4%C, 1%Si.

Los gases producidos contenían: 12%CO_2, 24%CO, 2%H_2, 2%CH_4 y 60%N_2 (análisis seco).

La escoria contenía 45% CaO + MgO; asumir que no hay hierro en la escoria.

PREGUNTAS

1. El peso necesario de la piedra caliza.
2. La cantidad de gases producidos por 100 kilogramos de arrabio.
3. El volumen del soplo (considerado seco), por 100 kilogramos de arrabio.
4. El porcentaje del carbono del coque oxidado en las toberas y por encima de estas.

SOLUCION

1.

Hay que determinar los peso del mineral, de la escoria y del fundente, porque los componentes de la escoria provienen de estos.

Determinación del peso del mineral:

Fe en mineral = Fe en arrabio.
Fe en arrabio = 100 – 4 – 1 = 95% = 1000x0,95 = 950 Kg.
Fe en Fe_2O_3 = 90·(112/160) = 63%
Peso del mineral = 950/0,63 = 1508 Kg.

Escoria = SiO_2 + CaO + MgO

Sean: X = peso del fundente, Y = peso de la escoria.

SiO_2 en mineral = 1508x0,1 = 150,8 Kg.
SiO_2 en coque = 1000x0,1 = 100 Kg.
SiO_2 en fundente = 0,02X
SiO_2 total cargado = 150,8 + 100 + 0,02X = 251 + 0,02X
Si en arrabio = 1000x0,01 = 10Kg.
SiO_2 reducido = 10·(60/28) = 21,4 Kg.
$SiO_2 \rightarrow$ escoria = 251 – 21,4 + 0,02X = 230 + 0,02X
SiO_2 en escoria = 100 – 45 = 55%

(1): $230 + 0{,}02X = 0{,}55Y$

CaO en fundente = 0,95·(56/100) = 0,5320X
MgO en fundente = 0,03·(40/84) = <u>0,0143X</u>
CaO + MgO = 0,5463X

(2): $0{,}5463X = 0{,}45Y$

Sistema de ecuaciones:
(1): $230 = 0{,}55Y - 0{,}02X$
(2): $0 = 0{,}45Y - 0{,}5463X$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, encontramos que X = 355
Peso de la piedra caliza = 355 Kg./ton. de arrabio (8-1)

2.

Utilizamos la expresión (1):

C en coque = 100x0,9 = 90 Kg.
$CaCO_3$ = 35,5x0,95 = 33,725 Kg.C.
C en $CaCO_3$ = 33,725·(12/100) = 4,047 Kg.
$MgCO_3$ = 35,5x0,03 = 1,065 Kg.
C en $MgCO_3$ = 1,065·(12/84) = 0,152 Kg.
C en arrabio = 100x0,04 = 4 Kg.

C total en gas = 90 + 4,047 + 0,152 – 4 = 90,199 Kg.

Asumimos 1 m^3 de gas y calculamos su contenido de C:

C en gas = 1x(0,24 + 0,12 + 0,02)·12/22,4 = 0,20357 Kg./m^3 de gas.

Gas seco = 90,199/0,20357 = 443 m^3

Volumen del gas seco = 443 m^3 por 100 Kg. de arrabio (8-2)

3.

N_2 en gas seco = 443x0,6 = 265,8 m^3

Aire = 265,8/0,79 = 336 m^3

Volumen del soplo (seco) = 336 m^3 por 100 Kg. de arrabio (8-3)

4.

En las toberas ocurre la siguiente reacción:

$2C + O_2 = 2CO$

O_2 del aire = 336 – 265,8 = 70,2 m^3

C de este = 70,2·(2x12/22,4) = 75,5 Kg.

C oxidado en las toberas = 75,5/90 = 0,84

C oxidado en las toberas = 84% (8-4)

C oxidado por encima de las toberas = C del coque – C de arrabio - C oxidado en toberas – C que reacciona con H_2O.

$C + H_2O = CO + H_2$

C de esta = 443x0,02·(12/22,4) = 4,746 Kg.

C oxidado por encima de las toberas = 90 – 75,5 – 4 – 4,746 = 5,574 Kg.

C " " " = 5,574/90 = 0,064

C oxidado por encima de las toberas = 6,4% (8-4)

EJERCICIO N°9 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composición:

C	4,0%
Si	1,2
Mn	0,9
Fe	93,9

El mineral tratado contenía:

Fe_2O_3	80%
MnO	1
SiO_2	12
Al_2O_3	3
H_2O	4

Por tonelada de arrabio producido, se utilizaron 1750 kilogramos de mineral; algo del hierro se fue a la escoria como FeO.

El volumen del gas producido fue de 4200 m^3 por tonelada de arrabio, y su composición fue la siguiente:

CO	26%	H_2O	4%
CO_2	12	N_2	58

El coque contenía 90%C y 10%SiO_2.

De fundente ($CaCO_3$ puro) se cargaron 480 kilogramos por tonelada de arrabio.

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de coque utilizados, por tonelada de arrabio.
2. La composición de la escoria (%).
3. El volumen del soplo, por tonelada de arrabio.
4. El carbono quemado por el soplo (todo a CO) y el volumen de CO formado por est...
5. El volumen de CO transformado a CO_2 en su paso a través del horno, y el porcentaje del CO_2 total en el gas que es formado de este modo.

SOLUCION

1.

C del coque = C en gases + C en arrabio – C en $CaCO_3$

CO = 4200x0,26 = 1092 m^3
CO_2 = 4200x0,12 = 504 m^3

C en CO = 1092·(12/22,4) = 585 Kg.
C en CO_2 = 504·(12/22,4) = 270 Kg.
Total C en gases = 855 Kg.

C en $CaCO_3$ = 480·(12/100) = 57,6 Kg.

C en arrabio = 1000x0,04 = 40 Kg.

C del coque = 855 + 40 – 57,6 = 837,4 Kg.

Coque = 837,4/0,9 = 931 Kg.

Peso del coque = 931 Kg./ton de arrabio (9-1)

2.

Escoria = FeO + SiO_2 + MnO + Al_2O_3 + CaO.

Fe_2O_3 = 1750x0,8 = 1400 Kg.
Fe en Fe_2O_3 = 1400·(112/160) = 980 Kg.
Fe en arrabio = 1000x0,939 = 939 Kg.
Fe → FeO = 980 – 939 = 41 Kg.
FeO = 41·(72/56) = 52,7 Kg.

SiO_2 en mineral = 1750x0,12 = 210 Kg.
SiO_2 en coque = 931x0,10 = 93,1 Kg.
Si en arrabio = 1000x0,012 = 12 Kg.
SiO_2 reducido = 12·(60/28) = 25,7 Kg.
SiO_2 en escoria = 210 + 93,1 – 25,7 = 277,4 Kg.

MnO en mineral = 1750x0,01 = 17,5 Kg.
Mn en arrabio = 1000x0,009 = 9 Kg.
MnO reducido = 9·(71/55) = 11,6 Kg.
MnO en escoria = 17,5 – 11,6 = 5,9 Kg.

Composición de la escoria: (9-2)

Al_2O_3 = 1750x0,03	= 52,5 Kg.	= 7,99%
CaO = 480·(56/100)	= 268,8 Kg.	= 40.89%
MnO	= 5,9 Kg.	= 0,90%
SiO_2	= 277,4 Kg.	= 42,20%
FeO	= 52,7 Kg.	= 8,02%
	657,3 Kg.	100,00%

3.
N_2 del gas = N_2 del soplo.

N_2 del gas = 4200x0,58 = 2436 m^3

Soplo = 2436/0,79 = 3083,5 m^3 **Volumen del soplo = 3083,5 m^3 / ton. de arrabio.** (9-3)

4.
Todo el soplo reacciona en las toberas, mediante la siguiente reacción:

$2C + O_2 = 2CO$

O_2 del soplo = 3083,5 – 2436 = 647,5 m^3
CO = 647,5x2 = 1295 m^3 **Volumen de CO formado por el soplo = 1295 m^3** (9-4)

C = 647,5·(2x12/22,4) = 693,75 Kg. **C quemado en toberas por el soplo = 693,75 Kg.** (9-4)

5.
C del coque = 837,4 Kg.
C del arrabio = 40 Kg.
C del coque → gas = 837,4 – 40 = 797,4

Si en arrabio = 12 Kg.
$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$ ∴ C = 10,3 Kg; CO = 19,2 m^3

Mn. En arrabio = 9 Kg.
$MnO + C = Mn + CO$ ∴ C = 2,0 Kg; CO = 3,7 m^3

C para Fe_2O_3 = 797,4 – 10,3 – 2,0 – 693,75 = 91,35 Kg.

Reducción directa:

$Fe_2O_3 + 3C = 2Fe + 3CO$ ∴ Fe_2O_3 = 91,35·(160/3x12) = 406 Kg.

FeO en escoria = 52,7 Kg.

$Fe_2O_3 = 2FeO + ½ O_2$
Fe_2O_3 → escoria = 52,7·(160/2x72) = 58,56 Kg.
Fe_2O_3 a reducir por CO = 1400 – 406 – 58,56 = 935,44 Kg.

$Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$

CO = 935,44·(3x22,4/160) = 392,9 m^3 = CO_2 **CO transformado a CO_2 = 392,9 m^3** (9-5)

CO_2 total = 4200x0,12 = 504 m^3
CO_2 formado = 392,9 / 504 = 0,7795 **CO_2 formado por CO = 77,95%** (9-5)

EJERCICIO Nº10 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composición:

Fe	93,6%
Si	2,1
C	3,6
Mn	0,7

Por tonelada de arrabio producido, se cargaron al horno 1740 kilogramos de minera de la siguiente composición:

Fe_2O_3	78%
SiO_2	9
Al_2O_3	5
MnO	1
H_2O	7

Algo del hierro no es reducido y pasa a la escoria como FeO.

El coque contiene 90%C y 10%SiO_2 y se carga una tonelada por tonelada de arrabio producido.

El fundente es $CaCO_3$ puro y se utilizan 360 kilogramos por tonelada de arrabio producido.

5/8 del carbono que se oxida en el horno pasan a CO y 3/8 a CO_2.

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de escoria producida, por tonelada de arrabio producido.
2. Los metros cúbicos de aire utilizados, por tonelada de arrabio.
3. Los metros cúbicos de gas producidos, por tonelada de arrabio, y su composición (%).

SOLUCION

1.
Escoria = FeO + SiO_2 + MnO + CaO + Al_2O_3.

Fe cargado = 1740x0,78·(112/160) = 950,04 Kg.
Fe en arrabio = 1000x0,936 = 936 Kg.
Fe → FeO = 950,04 – 936 = 14,04 Kg.
FeO = 14,04·(72/56) = 18,05 Kg.

SiO_2 cargado = 1740x0,09 + 1000x0,1 = 256,6 Kg.
Si cargado = 256,6·(28/60) = 119,75 Kg.
Si en arrabio = 1000x0,021 = 21 Kg.
SiO_2 de este = 21·(60/28) = 45 Kg.
SiO_2 en escoria = 256,6 – 45 = 211,6 Kg.

Mn en arrabio = 1000x0,007 = 7 Kg.
MnO de este = 7·(71/55) = 9,04 Kg.
MnO cargado = 1740x0,01 = 17,40 Kg.
MnO en escoria = 17,40 – 9,04 = 8,36 Kg.

CaO del $CaCO_3$ = 360x0,56 = 201,6 Kg.
Al_2O_3 del mineral = 1740x0,05 = 87 Kg.

Escoria = 18,05 + 211,6 + 8,36 + 201,6 + 87 = 526,61 Kg.

Escoria producida = 526,61 Kg./ton. de arrabio. (10-1)

2.

C en coque = 1000x0,9 = 900 Kg.
C en arrabio = 1000x0,036 = 36 Kg.
C del coque $\rightarrow$ gas = 900 – 36 = 864 Kg.
C del coque $\rightarrow$ CO = 864·(5/8) = 540 Kg.
C del coque $\rightarrow$ CO_2 = 864·(3/8) = 324 Kg.

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$: O = 540·(16/12) = 720 Kg.
$C + O_2 = CO_2$: O = 324·(32/12) = 864 Kg.
Total O_2 de oxidación = 1584 Kg. = 1584·(22,4/32) = 1108,8 m^3

Oxígeno liberado por la carga:

O del Fe_2O_3 = 1740x0,78x(48/160) = 407,2 Kg.
O del FeO de la escoria = 18,05·(16/72) = 4,01 Kg.
O_2 liberado por el Fe_2O_3 = 407,2 – 4,01 = 403,19 Kg. = 282,2 m^3

O_2 liberado por el SiO_2 = 1000x0,021·(32/28) = 24 Kg. = 16,8 m^3

O_2 liberado por el MnO = 1000x0,007·(16/55) = 2,04 Kg. = 1,4 m^4

O_2 del aire = 1108,8 – 282,2 – 16,8 – 1,4 = 808,4 m^3

Aire = 808,4/0,21 = 3850 m^3

Aire utilizado = 3850 m^3 / ton. de arrabio (10-2)

3.

Gas producido: (10-3)
CO_2 = 864x(22,4/32) + 360x0,44x(22,4/44) = 685 m^3 = 14,02%
N_2 = 3850x0,79 = 3042 m^3 = 62,25%
CO = 720x(22,4/32)x2 = 1008 m^3 = 20,63%
H_2O = 1740x0,07x(22,4/18) = 152 m^3 = 3,11%
Total gas = 4887 m^3 = 100,00%

EJERCICIO N°11.(7)

El mineral cargado a un alto horno tenía la siguiente composición:

Fe_2O_3	85%
SiO_2	11
Al_2O_3	4

Por cada 1,7 kilogramos de mineral, se cargaron un kilogramo de coque (90%C y 10%R) y 0,25 kilogramos de piedra caliza ($CaCO_3$ puro).

El horno produjo por día 500 toneladas de un arrabio que contenía 94%Fe, 4%C y 2%Si.

El volumen del soplo fue de 3150 metros cúbicos por tonelada de arrabio producido.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral cargado, por día.
2. La relación CO a CO_2 en el gas del horno, por volumen.
3. El porcentaje del poder total de calentamiento del coque que queda disponible en el gas.
4. El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas.

SOLUCION

1.
Peso de Fe en mineral = Peso de Fe en arrabio.

Fe en arrabio = 0,94x500 = 470 ton./día.
Fe en mineral = 85·(112/160) = 59,5%

Mineral = 470/0,595 = 790

Mineral cargado por día = 790 ton. (11-1)

2.
Soplo = 3150x500 = 1'575.000 m^3/día.
O del soplo = 1'575.000x0,21 = 330750 m^3 = 472642 Kg.

Coque cargado = 790000/1,7 = 464706 Kg./día
C en coque = 464706x0,9 = 418235 Kg.
C en arrabio = 500000x0,04 = 20000 Kg.
C del coque → gas = 418235 – 20000 = 398235 Kg.

Si en arrabio = 500000x0,02 = 10000 Kg.
O de este Si = 10000·(32/28) = 11429 Kg.

Fe_2O_3 = 790000x0,85 = 671500 Kg.
O de este = 671500 – 470000 = 201500 Kg.
Total O en gas (sin el de $CaCO_3$) = 201500 + 11429 + 472642 = 685571 Kg./día.

O → CO en toberas = 398235·(16/12) = 530980 Kg.
CO formado en toberas = 530980x(28/16) = 929215 Kg.

Del oxígeno total, una parte reacciona con el CO y se convierte en CO_2 en la zona de reducción indirecta:

$MO + CO = M + CO_2$

O → CO → CO_2 = 685571 – 530980 = 154591 Kg.
CO → CO_2 = 154591·(28/16) = 270534 Kg.
CO_2 formado = 270534x(44/28) = 425125 Kg.

Fundente = 790000x(0,25/1,7) = 116177 Kg.

CO_2 del $CaCO_3$ = 116177x(44/100) = 51118 Kg.
CO_2 total = 425125 + 51118 = 476643 Kg.

CO en gas final = 929215 – 270534 = 658681 Kg.
CO = 658681x(22.4/28) = 526945 m^3

CO_2 = 476643x(22,4/44) = 242451 m^3

CO/CO_2 = 526945/242451 = 2,17

CO:CO_2 = 2,17:1 (11-2)

3.
P.C.B del coque = 418235x8100 = 3387'703.500 Kcal.
P.C.B del gas = 3034x526945 = 1598'751.130 Kcal

P.C.B del gas = 1598'751.130/3387'703.500 = 0,4719

P.C.B del gas = 47,19% de la del coque (11-3)

4.
En toberas:
$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$

C = 330750x(24/22,4) = 354375 Kg.

C quemado en toberas = 354375/418235 = 0,845
C del coque quemado en toberas = 84,5% del total (11-4)

EJERCICIO N°12 (7)

El mineral de la siguiente composición fue procesado en un alto horno.

Fe_2O_3	82%
SiO_2	10
Al_2O_3	5
H_2O	3

Se utilizó como fundente $CaCO_3$ puro, y el coque contenía 88%C, 1%H y 11%SiO_2.

Se cargaron por tonelada de mineral: 600 kilogramos de coque, 120 de fundente y 2140 metros cúbicos de soplo; y se produjeron 590 kilogramos de arrabio con 95%Fe, 3,5%C y 1,5%Si.

PREGUNTAS

1. El peso y composición de la escoria producida, por tonelada de mineral.
2. El volumen y composición del gas de alto horno.
3. El peso del soplo utilizado por tonelada de arrabio producido, y su volumen medido a las condiciones usuales, es decir: temperatura, 600°C; presión 2000 mm, de mercurio.

SOLUCION

1.
Escoria = $FeO + SiO_2 + Al_2O_3 + CaO$

Fe_2O_3 = 0,82x1000 = 820 Kg.
Fe en Fe_2O_3 = 820·(112/160) = 574 Kg.
Fe en arrabio = 590x0,95 = 560,5 Kg.
Fe → FeO = 574 – 560,5 = 13,5 Kg.
FeO = 13,5x(72/56) = 17,3 Kg.

SiO_2 en mineral = 1000x0,10 = 100 Kg.
SiO_2 en coque = 600x0.11 = 66 Kg.
Si en arrabio = 590x0,015 = 8,85 Kg.
SiO_2 reducido = 8,85x(60/28) = 19 Kg.
SiO_2 a escoria = 100 + 66 – 19 = 147 Kg.

Al_2O_3 = 1000x0,05 = 50 Kg.
CaO = 120x(56/100) = 67,2 Kg.

Peso y composición de la escoria (12-1)

FeO =	17,3 Kg. =	6,5%
SiO_2 =	147,0 Kg. =	52,0%
Al_2O_3 =	50,0 Kg. =	17,7%
CaO =	67.2 Kg. =	23,8%
	281,5 Kg.	100,0%

2.

Soplo = 2140 m^3

O del soplo = 2140x0,21 = 449,4 m^3 = 640 Kg.

O del Fe_2O_3 = 820 – 13,5 – 560,5 = 246 Kg.

O del SiO_2 = 19 – 8m85 = 10,15 Kg.

Total O = 640 + 246 + 10,15 = 896,15 Kg.

C en coque = 600x0,88 = 528 KG.
C en arrabio = 590x0,035 = 20,65 Kg.
C del coque → gas = 528 – 20,65 = 507,35 Kg.

O del CO = 507,35x(16/12) = 677 Kg.
CO = 677·(28/16) = 1185 Kg.

O restante = 896,15 – 677 = 219,15 Kg.

Este O forma CO_2 en reacción con CO:

CO → CO_2 = 219,15x(28/16) = 384 Kg.
CO en gas = 1185 – 384 = 801 Kg. = 641 m^3

CO_2 formado = 384·(44/28) = 602 Kg.
CO_2 del $CaCO_3$ = 120 – 67,2 = 52,8 Kg.
CO_2 total = 602 + 52,8 = 654,8 Kg. = 333 m^3

Volumen y composición del gas: (12-2)

N_2 = 2140 – 449,4	= 1690,6	= 61,1%
H_2O = 1000x0,03x22,4/18 =	37,4 m^3 =	1,3%
H_2 = 600x0.01x(22,4/2) =	67,2 m^3 =	2,4%
CO	= 641,0 m^3 =	23,2%
CO_2	= 333,0 m^3 =	12,0%
Total gas	= 2769.2 m^3	100,0%

3.

Para 1 tonelada de arrabio:

Soplo = 2140x(1000/590) = 3620 m^3 a C.N.

Peso del soplo = 3620x1,293 = 4690 Kg.

Peso del soplo = 4690 Kg./ton. de arrabio (12-3)

Llevamos el soplo a las condiciones reales:

P_1 = 760 mm P_2 = 2000 mm.
T_1 = 273K T_2 = 873K
V_1 = 3620 m^3 V_2 =?

$V_2 = V_1\cdot(P_1/T_1)\cdot(T_2/P_2)$ = 4410 m^3

Volumen del soplo a condiciones usuales = 4410 m^3 (12-3)

EJERCICIO N°13 (7)

El siguiente mineral fue fundido en un alto horno, utilizando 3400 libras por tonelada corta de arrabio producido.

Fe_2O_3	80%	Al_2O_3	3%
MnO	3	H_2O	4
SiO_2	10		

Se utilizó como fundente $CaCO_3$ puro, y el coque contenía: 87%C; 11%SiO_2 y 2%Al_2O_3.

El consumo de coque fue de 1700 libras por tonelada de arrabio, y se utilizó suficiente fundente como para producir una escoria con 34,6% de CaO.

Se introdujeron 91000 pies cúbicos de soplo por tonelada de arrabio.

El arrabio contenía:

Fe	93,0%
Mn	2,0
Si	1,4
C	3,6

PREGUNTAS

1. Las libras del fundente utilizado, por tonelada de mineral.
2. La composición de la escoria (%).
3. El volumen y composición del gas producido, por tonelada de arrabio.
4. El porcentaje del valor de calentamiento del coque que permanece en el gas.

SOLUCION

1.

La referencia para esta pregunta es 1 tonelada de mineral y no de arrabio, pero como todo el texto del problema está referido al arrabio, debemos determinar cuanto arrabio produce 1 tonelada corta de mineral.

1 tonelada corta = 2000 libras.

Arrabio = 2000·(2000/3400) = 1176,5 libras por tonelada de mineral.
Coque = 1176,5·(1700/2000) = 1000 " " "

Debemos calcular el peso de la escoria que contiene CaO y en base a este último calcular el $CaCO_3$.

Escoria = FeO + MnO + SiO_2 + Al_2O_3 + CaO.

Fe_2O_3 = 2000x0,8 = 1600 lbs.
Fe en este = 1600·(112/160) = 1120 lbs.
Fe en arrabio = 1176,3x0,93 = 1094,15 lbs.
Fe → FeO = 1120 – 1094,15 = 25,85 lbs.
FeO = 25,85·(72/56) = 33,3 lbs.

MnO en mineral = 2000x0,03 = 60 lbs.
Mn en arrabio = 1176,5x0,02 = 23,53 lbs.
MnO reducido = 23,53·(71/55) = 30,4 lbs.
MnO en escoria = 60 – 30,4 = 29,6 lbs.

SiO_2 en mineral = 2000x0,1 = 200 lbs.
SiO_2 en coque = 1000x0,11 = 110 lbs.
Si en arrabio = 1176,5x0,014 = 16,47 lbs.
SiO_2 reducido = 16,47·(60/28) = 35,3 lbs.
SiO_2 en escoria = 200 + 110 – 35,3 = 274,7 lbs.

Al_2O_3 en mineral = 2000x0,03 = 60 lbs.
Al_2O_3 en coque = 1000x0,02 = 20 lbs.
Al_2O_3 en escoria = 80 lbs.

Total escoria sin CaO = 33,3 + 29,6 + 174,7 + 80 = 417,6 lbs. = 65,4%
Escoria total = 417,6/0,654 = 638,5 lbs.

CaO = 638,5 – 417,6 = 220,9 lbs.

$CaCO_3$ = 220,9·(100/56) = 394,5 lbs.
Fundente = 394,5 libras por tonelada de mineral (13-1)

2.

Composición de la escoria (13-2):

FeO	33,3 lbs	5,2%
MnO	29,6	4,2
SiO_2	274,7	43,0
Al_2O_3	80,0	12,5
CaO	220,9	34,6%
	638,5 lbs	100,0%

3.
Gas = CO + CO_2 + N_2 + H_2O:

Soplo = 91000 ft^3
O_2 del soplo = 91000x0,21 = 19110 ft^3
O del soplo = 19110·(32/359) = 1703,4 lbs.

Fe_2O_3 = 3400x0,8 = 2720 lbs.
Fe en arrabio = 2000x0,93 = 1860 lbs.
Fe en Fe_2O_3 = 2720·(112/160) = 1904 lbs.
Fe → FeO = 1904 – 1860 = 44 lba.
FeO = 44·(72/56) = 56,7 lbs.
O aportado por el Fe_2O_3 = 2720 – 1860 – 56,7 = 803,3 lbs.

MnO en mineral = 3400x0,03 = 102 lbs.
Mn en arrabio = 2000x0,02 = 40 lbs.
MnO reducido = 40·(71/55) = 51,8 lbs.
O aportado por el MnO = 51,8 – 40 = 11,8 lbs.

Si en arrabio = 2000x0,014 = 28 lbs.
O aportado por el SiO_3 = 28·(32/28) = 32 lbs.

Total O del gas sin O del CO_2 del $CaCO_3$ = 1705 + 803,3 + 11,8 + 32 = 2552,1 lbs.

C en coque = 1700x0,87 = 1479 lbs.
C en arrabio = 2000x0,036 = 72 lbs.
C del arrabio → gas = 1479 – 72 = 1407 lbs.

O → CO = 1407·(16/12) = 1876 lbs.

CO total formado = 1876·(28/16) = 3283 lbs.
De este CO, una parte se convierte el CO_2 por interacción con el O. Debemos calcular cuanto O reacciona con CO para producir CO_2 y luego calcular el CO que finalmente pasa al gas.

O → CO → CO_2 = 2552 – 1876 = 676 lbs.
CO → CO_2 = 676·(28/16) = 1183 lbs.

$CO \rightarrow$ gas = 3283 – 1183 = 2100 lbs. = 26925 ft^3

CO_2 formado = 1183·(44/28) = 1859 lbs.
$CaCO_3$ = 394·(3400/2000) = 670 lbs.
CO_2 de este = 670·(44/100) = 294,8 lbs.
CO_2 total = 1859 + 294,8 = 2153,8 lbs. = 17573 ft^3

N_2 = 91000x0,79 = 71890 ft^3

H_2O = 3400x0,04 = 136 lbs = 2712 ft^3

Volumen y composición del gas (13-3)

CO	=	26925 ft^3 =	22,6%
CO_2	=	17573 ft^3 =	14,8%
H_2O	=	2712 ft^3 =	2,3%
N_2	=	71890 ft^3 =	60,3%
Total gas =		119100 ft^3 =	100,0%

4.
Valor de calentamiento del coque (C) = 14600x1479 = 21'593.400 BTU
Valor de calentamiento del gas (CO) = 341x26925 = 9'181.425 BTU

Valor de calentamiento del gas = 9'181.425/21'593.400 = 0,425
Valor de calentamiento del gas = 42,5% del de coque. (13-4)

EJERCICIO N°14 (7)

Un mineral hematita de hierro contiene 78%Fe_2O_3. Este es reducido en un alto horno, utilizando un coque que contiene 83%C.

El gas producido en el horno debe contener un exceso de CO, la ecuación de la reducción tiene la siguiente forma:

$$Fe_2O_3 + XCO = 2Fe + 3CO_2 + YCO$$

Asumir que la relación $CO:CO_2$ en el gas producido es 7:4.
El arrabio producido contiene: 93%Fe y 4%C.

PREGUNTAS

1. La ecuación de reducción, balanceada con números enteros.
2. El consumo de coque por tonelada métrica de arrabio.
3. El CO para la reducción se produce quemando el carbono del coque con aire (soplo). ¿Cuantos metros cúbicos de soplo se requieren por tonelada de arrabio producido?. ¿Cuantas toneladas de soplo?.

SOLUCION

1.
Reacción de reducción:

$Fe_2O_3 + XCO = 2Fe + 3CO_2 + YCO$.

De la observación de esta ecuación se puede deducir que:
$Y/3 = 7/4 = CO/CO_2$

También que $X = 3 + Y = 12/4 + 21/4 = 33/4$

La ecuación se puede ahora escribir de la siguiente manera:

$Fe_2O_3 + (33/4)CO = 2Fe + 3CO_2 + (21/4)CO$

Si multiplicamos por 4, tendremos:

Ecuación balanceada con números enteros (14-1):
$4Fe_2O_3 + 33CO = 8Fe + 12CO_2 + 21CO$

2.
Fe en arrabio = 1000x0,93 = 930 Kg.
C en gas = 930·(33x12/8x56) = 822 Kg.
C en arrabio = 1000x0,04 = 40 Kg.
C total = 822 +40 = 862 Kg.

Coque = 862/0,83 = 1039 Kg.

Coque consumido = 1039 Kg. (14-2)

3.
La reacción para producir CO:

$C + ½ O_2 = CO$

O = 822·(16/12) = 1096 Kg. = 767 m^3

Soplo = 767/0,21 = 3652 m^3

Soplo requerido = 3652 m^3 (14-3)

Soplo = 1096/0,232 = 4724 Kg. = 4,724 ton.

Peso del soplo = 4,724 ton. (14-3)

4.
Gas = $N_2 + CO + CO_2$

$C \rightarrow CO$ = 822·(7/11) = 523 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 822 − 523 = 299 Kg.

Composición del gas (14-4)

N_2 = 3652x0,79	= 2885,08 m^3	= 65,28%
CO = 523·(22,4/12)	= 976,27 m^3	= 22,09%
CO_2 = 299·(22,4/12)	= 558,13 m^3	= 12,63%
Total gas	= 4419,48 m^3	= 100,00%

EJERCICIO Nº15 (7)

La ecuación para la reducción del Fe_2O_3 por el CO es la siguiente:

(1) $Fe_2O_3 + XCO = 2Fe + 3CO_2 + YCO$

El arrabio producido contiene 94%Fe y 3,6%C. El carbono es suministrado por coque que contiene 84%C.

PREGUNTAS

1. La ecuación balanceada para la reducción, si se produce una relación $CO:CO_2$ = 2:1.
2. El consumo de coque, en libras por tonelada larga de arrabio producido.

3. Si el CO para la reducción es producido por la combustión del carbono del coque con aire, ¿cuántos pies cúbicos de aire serán requeridos para producir el CO necesario para una tonelada de arrabio?.

4. ¿Cuál será la composición (%) de la mezcla del gas resultante de la combustión y de la reducción combinadas?.

5. Si el mineral utilizado contiene 75%Fe_2O_3, ¿cuántas toneladas de mineral serán requeridas por tonelada de arrabio producido?.

6. Si en combinación con la ecuación (1), 10% del hierro fuera reducido por carbono sólido de acuerdo con la ecuación

$$(2)\ Fe_2O_3 + 3C = 2Fe + 3CO$$

¿Cuál sería el consumo de coque, por tonelada de arrabio, asumiendo la misma relación de $CO:CO_2 = 2:1$ en los gases?.

SOLUCION

1.

De acuerdo a la reacción (1), tendremos:

$CO/CO_2 = Y/3 = 2/1 \therefore$

$Y = 6$

Por tanto: $X = Y + 3 = 9 \therefore$

La reacción para la reducción quedará: (15-1)

$Fe_2O_3 + 9CO = 2Fe + 3CO_2 + 6CO$

2.

1 tonelada larga = 2240 libras.

Fe en arrabio = 2240x0,94 = 2105,6 lbs.

C en arrabio = 2240x0,036 = 80,64 lbs.

C en reacción = 2105,6·(9x12/112) = 2030,4 lbs.

C total = 2030,4 + 80,64 = 2111,04 lbs.

Coque = 2111,04/0,84 = 2513,14 lbs.

Coque consumido = 2513,14 lbs./ton. de arrabio. (15-2)

3.

O de reacción = 2030,4·(16/12) = 2707,2 lbs.

O de reacción = 2707,2·(359/32) = 30371,4 ft^3

Aire = 30371,4/0,21 = 144626 ft^3

Aire requerido = 144626 ft^3/ton. de arrabio (15-3)

4.

Dado que $CO/CO_2 = 2:1$, 2/3 del C pasan a CO y 1/3 a CO_2.

$C \rightarrow CO = 2030,4\cdot(2/3) = 1353,6$ lbs.

$C \rightarrow CO_2 = 2030,4 - 1353,6 = 676,8$ lbs.

Composición del gas (15-4):

CO = 1353,6x(359/12) =	40495,2 ft^3	= 23,14%
CO_2 = 676,8·(359/12) =	20247,6 ft^3	= 11,57%
N_2 = 144626x0,79 =	114254,5 ft^3	= 65,29%
Total gas =	174997,3 ft^3	= 100,00%

5.
Fe en arrabio = Fe en mineral:

Fe en arrabio = 2105,6 lbs.

Fe_2O_3 = 2105,6·(160/112) = 3008 lbs.

Mineral = 3008/0,75 = 4010,7 lbs. = 4010,7/2240 = 1,79 ton.
Mineral = 1,79 ton./ton. de arrabio (15-5)

6.
Fe para la reacción (2) = 2105,6x0,10 = 210,56 lbs.
C para este = 210,56·(3x12/112) = 68 lbs.
Fe para la reacción (1) = 2105,6 – 210,56 = 1895,04 lbs.

La estequiometría de la reacción (1) debe variar al variar la cantidad de Fe.
Para 2105,6 libras de Fe, la relación $CO:CO_2$ = 2:1, entonces para 1895,04 cual será para que la relación final de estos gases siga siendo la misma?:
Hagamos la siguiente regla de tres:

2105,6 → 2
1895,04 → X ∴
Relación = 1895,04x2 / 2105,6 = 1,8:1
Y = 1,8x3 = 5,4; X = 5,4 + 3 = 8,4

La reacción (1) quedaría:

$Fe_2O_3 + 8,4CO = 2Fe + 3CO_2 + 5,4CO$

C = 1895,04·(8,4x12/112) = 1705,54 lbs.
C total = 1705,54 + 68 + 80,64 = 1854,18 lbs.

Coque = 1854,18/0,84 = 2207,4 lbs.
Coque = 2207,4 lbs./ton de arrabio (15-6)

EJERCICIO N°16 (7)

Un alto horno trata por día 1000 toneladas de un mineral que contiene:

Fe_2O_3	80%
SiO_2	12
MnO_2	5
Al_2O_3	2
H_2O	1

Todo el Fe_2O_3, la mitad del MnO_2 y un cuarto del SiO_2 son reducidos en el horno.
El arrabio contiene 4% de carbono.
Por libra de mineral se utilizan 0,2 libras de $CaCO_3$ y 0,5 libras de coque. El coque contiene 90%C y 10%SiO_2. Asumir que el SiO_2 del coque se escorifica completamente.
Los gases del horno contienen 24%CO y 9%CO_2. El manganeso que pasa a la escoria lo hace como MnO.

PREGUNTAS

1. Las libras de arrabio producido por día, por tonelada de arrabio producido.
2. Las libras de escoria producidas por día, por tonelada de arrabio producido.
3. Los pies cúbicos de gases producidos por día.

SOLUCION

1.
Carga (en libras)

Mineral = 1000x2000 = 2'000.000
Fe_2O_3 = 2'000.000x0,8 = 1'600.000
SiO_2 = 2'000.000x0,12 = 240000
MnO_2 = 2'000.000x0,05 = 100000
Al_2O_3 = 2'000.000x0,02 = 40000
H_2O = 2'000.000x0,01 = 20000

$CaCO_3$ = 2'000.000x0,2 = 400000

Coque = 2'000.000x0,5 = 1'000.000
C = 1'000.000x0,9 = 900000
SiO_2 = 1'000.000x0,1 = 100000

Fe en arrabio = 1'600.000x(112/160) = 1'120.000

MnO_2 reducido = 100000x0,5 = 50000
Mn a arrabio = 50000·(55/87) = 31609,2

SiO_2 reducido = 240000·(1/4) = 60000
Si a arrabio = 60000·(28/60) = 28000

96% de arrabio = 1'120.000 + 31609 + 28000 = 1'179.609

Arrabio = 1'179.609/0,96 = 1'228.759 lbs.

Libras de arrabio producido por día = 1'228.759 (16-1)

2.
Escoria = SiO_2 + MnO + Al_2O_3 + CaO.

SiO_2 = 240000 + 100000 – 60000	= 180000 Lbs.
MnO = 50000·(71/87)	= 40805 "
Al_2O_3	= 40000 "
CaO = 400000x0,56	= 224000 lbs.
Total escoria	= 584805 lbs.

Libras de escoria producida por día = 584805 (16-2)

3.
Utilizando la expresión (1):

C total en gas = 900000 + 40000x0,12 – 1'228759x0,04 = 898850 lbs.

Supongamos 1 ft^3 de gas para ver cuanto C contiene:

C/ft^3 de gas = (0,24 + 0,09) x (12/359) = 0,011 lbs/ft^3

Gas = 898850/0,011 = 81'486.654

Gas producido por día = 81'486.654 ft^3 (16-3)

EJERCICIO N°17 (7)

Un alto horno funde un mineral de la siguiente composición:

Fe_3O_4	70%	P_2O_5	1%
Fe_2O_3	5	MnO_2	4
SiO_2	10	H_2O	10

El horno produce por día 900 toneladas métricas de arrabio. Se utiliza suficiente fundente como para producir una escoria que contenga 24%CaO. El fundente fue caliza pura. Por tonelada de mineral se utilizaron 0,48 toneladas de coque. El coque contiene 86%C, 9%SiO_2 y 5%H_2O. Todo el fósforo cargado, la mitad del manganeso y un quinto del silicio son reducidos y van al arrabio, el cual contiene además, por análisis, 4%C. 88% del carbono del coque es quemado en las toberas. Asumir que no hay hierro en la escoria.

PREGUNTAS

1. La composición del arrabio (%).
2. El peso del mineral fundido por día.
3. El peso del fundente utilizado por día.
4. La composición de los gases formados.

SOLUCION

1.

Determinación del peso del mineral:

Sea X = peso del mineral:

Fe_3O_4 = 0,70X; Fe en Fe_3O_4 = 0,70X·(168/232) = 0,50689X
Fe_2O_3 = 0,05X; Fe en Fe_2O_3 = 0,05X·(112/160) = <u>0,03500X</u>
Fe total en mineral = 0,54189X

Coque = 0,48X

SiO_2 total cargado = 0,09x0,48X + 0,10X = 0,1432X
SiO_2 reducido = 0,1432X·(1/5) = 0,02864X
Si en arrabio = 0,02864X·(28/60) = 0,01335X

MnO_2 cargado = 0,04X
MnO_2 reducido = 0,04X·(1/2) = 0,02X
Mn en arrabio = 0,02X·(55/87) = 0,01265X

P_2O_5 cargado = 0,01X
P en arrabio = 0,01X·(62/142) = 0,0043662X

96% de arrabio = 0,96x900 = 864 ton.
864 ton. = 0,54189X + 0,01335X + 0,01265X + 0,0043662X = 0,57225X ∴
X = 864/0,572 = 1611 ton. = peso del mineral.

<u>Composición del arrabio</u> (17-1):

Fe = 1511x0,542 = 818,962 ton. = 90,91%
Si = 1511x0,01335 = 20,172 ton. = 2,24%
P = 1511x0,00437 = 6,603 ton. = 0,73%
Mn = 1511x0,01265 = 19,114 ton = 2,12%
C = 900x0,04 = 36,000 ton. = 4,00%

2.
El peso del mineral ya fue determinado en el punto anterior.

Peso del mineral = 1511 ton./día. (17-2)

3.
El peso del fundente lo determinaremos sobre la base de la escoria:

SiO_2 total cargado = 1511x0,1432 = 216,37 ton.
SiO_2 reducido = 1511x0,02864 = 43,27 ton.
SiO_2 a escoria = 216,37 – 43,27 = 173,10 ton.

MnO_2 cargado = 1511x0,04 = 60,44 ton.
$MnO_2 \rightarrow MnO$ = 60,44·(1/2) = 30,22 ton.
MnO a escoria = 30,22x71/87 = 24,7 ton.

Escoria sin CaO = 173,10 + 24,7 = 197,8 ton. = 76%
Peso de la escoria = 197,8/0,76 = 260 ton.

CaO = 260 – 197,8 = 62,2 ton.

Fundente = $CaCO_3$ = 62,2x100/56 = 111 ton.

Peso del fundente = 111 ton./día. (17-3)

4.
Coque = 0,48x1511 = 725,28 ton.
C en coque = 725,28x0,86 = 623,74 ton.
C que reacciona en toberas = 623,74x0,88 = 548,89 ton.

Reacción en las toberas:

$2C + O_2 = 2CO$

O = 584,89x32/24 = 731,85 ton.
CO formado = 548,89x28/12 = 1280,74 ton.

C del coque restante = 623,74 – 548,89 – 36 = 38,85 ton.

Fe_3O_4 = 1511x0,7 = 1057,7 ton.
Fe en este = 1511x0,50689 = 765,9 ton.
O aportado por Fe_3O_4 = 1057,7 – 765,9 = 291,8 ton.

Fe_2O_3 = 1511x0,05 = 75,55 ton.
Fe en este = 75,55x0,035 = 52,88 ton.
O aportado por el Fe_2O_3 = 75,55 – 52,88 = 22,67 ton.

O aportado por el SiO_2 = 43,27 – 20,17 = 23,10 ton.

O aportado por el MnO_2 = (30,22 – 19,11) + (30,22 – 24,7) = 16,63 ton.

P_2O_5 = 1511x0,01 = 15,11 ton.
O aportado por este = 15,11 – 6,6 = 8,51 ton.

Total O de reducción = 291,8 + 22,67 + 23,10 + 16,63 + 8,51 = 362,71 ton.

O del C restante = 38,85x16/12 = 41,8 ton.
CO formado = 51,8x28/16 = 90,65 ton.
CO total formado = 1280,74 + 90,65 = 1371,39 ton.
O restante = 362,71 – 51,8 = 310,91 ton.
CO de este = 310,91x28/16 = 544,09 ton.

$CO \rightarrow gas = 1371,39 - 544,09 = 827,3$ ton.
$CO \rightarrow gas = 827,3x1000x22,4/28 = 661840\ m^3$

El CO del O restante reacciona con O para formar CO_2

CO_2 formado = 544,09x44/28 = 855 ton.
CO_2 del $CaCO_3$ = 111 – 62,2 = 48,8 ton.
CO_2 en gas = 855 + 48,8 = 903,8 ton.
CO_2 en gas = 903,8x1000x22,4/44 = 460000 m^3

O del soplo = (731,85x22,4/32)x1000 = 512300 m^3

N_2 en gas = 512300x79/21 = 1'927.000 m^3

H_2O en gas = 1000x(725,28x0,05 + 1511x0,1)x22,4/18 = 233160 m^3

Composición del gas (17-4)

CO	=	661.840 m^3 =	20,17%
CO_2	=	460.000 m^3 =	14,02%
N_2	=	1'927.000 m^3 =	58,71%
H_2O	=	233.160 m^3 =	7,10%
Total gas	=	3'282.000 m^3 =	100,00%

EJERCICIO N°18 (7)

Un alto horno procesa el siguiente mineral:

Fe_2O_3	77%	SiO_2	11%
MnO	3	Al_2O_3	4
P_2O_5	3	H_2O	2

El coque tiene 90%C, 9%SiO_2 y 1%H_2O. Se utilizan 1200 libras de coque por tonelada de mineral.

El fundente utilizado (100% de $CaCO_3$ puro), totalizó 860 libras por tonelada de arrabio producido.

El gas del horno contenía una relación de 2 ½ partes de CO a 1 parte de CO_2.

El horno reduce a metal todo el Fe_2O_3, nueve décimos del MnO, todo el P_2O_5 y un quinto de todo el SiO_2.

El arrabio contiene 4% de carbono.

PREGUNTAS

1. Las libras de arrabio producido a partir de una tonelada de mineral.
2. Las libras de escoria producida, por tonelada de arrabio.
3. Los pies cúbicos de soplo utilizado, por tonelada de arrabio.
4. Los pies cúbicos de gas producido, por tonelada de arrabio.

SOLUCION

1.
Arrabio = Fe + C + Mn + P + Si:

Base = 1 tonelada de mineral = 2000 libras.

Fe_2O_3 = 2000x0,77 = 1540
Fe a arrabio = 1540x112/160 = 1080 libras.

MnO = 2000x0,03 = 60
MnO reducido = 60x9/10 = 54
Mn a arrabio = 54x55/71 = 41,8 libras

P_2O_5 = 2000x0,03 = 60
P a arrabio = 60x62/142 = 26,2 libras

SiO_2 en mineral = 2000x0,11 = 220
SiO_2 en coque = 1200x0,09 = 108
SiO_2 total cargado = 220 + 108 = 328
SiO_2 reducido = 328x1/5 = 65,6
Si a arrabio = 65,6x28/60 = 30,6 libras.

96% de arrabio = Fe + Mn + P + Si
96% de arrabio = 1080 + 41,8 + 26,2 + 30,6 = 1178,6 libras.

Arrabio = 1178,6/0,96 = 1227,7
Peso del arrabio = 1227,7 libras por ton. de mineral (18-1)

2.
Hay que calcular la cantidad de mineral necesaria para producir 1 tonelada de arrabio.

Mineral = 2000·(2000/1227,7 = 3258,12 libras.

Coque = 2000x(1200/1227,7) = 1954,87 libras.

Escoria = MnO + SiO_2 + Al_2O_3 + CaO

MnO = 0,03x3258,12 = 97,74
MnO a escoria = 97,74x1/10 = 9,774 libras.

SiO_2 total = 3258,12x0,11 + 1954,87x0,09 = 534,33
SiO_2 a escoria = 534,33x4/5 = 427,46 libras.

Al_2O_3 = 3258,12x0,04 = 130,325 libras.

CaO = 860x56/100 = 481,6 libras.

Escoria = 9,774 + 427,46 + 130,325 + 481,6 = 1049,16
Peso de la escoria = 1049,16 libras/ton. de arrabio (18-2)

3.
C en coque = 1954,87x0,09 = 1759,38
C en arrabio = 2000x0,04 = 80
C del coque a gas = 1759,38 – 80 = 1679,38 libras.
C en $CaCO_3$ = 860x12/100 = 103,2
C total en gas = 1679,38 + 103,2 = 1782,58 libras.

CO:CO_2 = 2 ½ :1 = (5/7):(2/7) ∴

C → CO = 1782,58·(5/7) = 1273,25
C → CO_2 = 1782,58 – 1273,27 = 509,55

O del CO = 1273,27x16/12 = 1697,69
O del CO_2 = 509,55x32/12 = <u>1358,80</u>
O total de estos = 3056,49 libras

Oxígeno de las reducciones:

Fe_2O_3 = 3258,12x0,77 = 2508,75
O aportado por este = 2508,75x40/160 = 752,63 libras.

SiO_2 reducido = 534,33 – 427,46 = 106,87
O aportado por este = 106,87x32/60 = 57,2 libras.

MnO reducido = 97,74 – 9,774 = 87,966
O aportado por este = 87,966x16/71 = 19,82 libras.

O aportado por $CaCO_3$ = 860 – 481,6 – 103,2 = 275,2 libras.

P_2O_5 = 3258,12x0,03 = 97,74
O aportado por este = 97,74x80/142 = 55 libras.

O total de reducciones = 752,63 + 57,2 + 19,82 + 275,2 + 55 = 1159,85 libras.

O del soplo = 3056,49 – 1159,85 = 1896,64 libras.
O del soplo = 1896,64x359/32 = 21280 ft^3

Soplo = 21280/0,21 = 101323

Soplo = 101323 ft^3/ton. de arrabio. (18-3)

4.
Gas = CO + CO_2 + N_2 + H_2O

CO = (1273,27 + 1697,69)x359/28 = 38092,0 ft^3

CO_2 = (509,55 + 1358,80)x359/44 = 15244,0 ft^3

N_2 = 101323x0,79 = 80045,0 ft^3

H_2O = (3258,12x0,02 + 1954,87x0,01)x359/18 = <u>1689,6 ft^3</u>

Total gas = 135070,6 ft^3

Gas producido = 135071 ft^3/ton. de arrabio (18-4)

EJERCICIO N°19 (7)

Un alto horno procesa 1400 toneladas métricas por día del siguiente mineral:

Fe_3O_4	68%	$Ca_3(PO_4)_2$	3%
Fe_2O_3	8	SiO_2	12
MnO	5	H_2O	4

Se utiliza suficiente fundente ($CaCO_3$) puro como para producir una escoria con 38%CaO. Se utilizan también 0,7 toneladas de coque por tonelada de mineral; el coque contiene 88%C, 8%SiO_2 y 4%H_2O.

El soplo es de 4000 metros cúbicos por tonelada de arrabio.

Se redujeron las cantidades siguientes: Fe y P, 100%; Mn, 40%; SiO_2, 22%. El Fe absorbe el 4% de su peso en carbono.

PREGUNTAS

1. El peso y composición del arrabio y la escoria, y el volumen y composición del gas producido por día.

SOLUCION

1.
Mineral (toneladas):
Fe_3O_4 = 1400x0,68 = 952
Fe_2O_3 = 1400x0,08 = 112
MnO = 1400x0,05 = 70
$Ca_3(PO_4)_2$ = 1400x0,03 = 42
SiO_2 = 1400x0,12 = 168
H_2O = 1400x0,04 = 56

Coque = 1400x0,7 = 980
C = 980x0,88 = 862,4
SiO_2 = 980x0,08 = 78,4
H_2O = 980x0,04 = 39,2

Arrabio:

Fe en Fe_3O_4 = 952x168/232 = 689,4
O de este = 952 – 689,4 = 262,6
Fe en Fe_2O_3 = 112x112/160 = 78,4
O de este = 112 – 78,4 = 33,6
Total Fe cargado = 689,4 + 78,4 = 767,8

MnO reducido = 70x0,4 = 28
Mn a arrabio = 28x55/71 = 21,7
MnO a escoria = 70 – 28 = 52
O de este = 28 – 21,7 = 6,3

$Ca_3(PO_4)_2$ = 3Ca + 2P + 4 O_2
P = 42x62/310 = 8,4
CaO = 42x56/310 = 7,6
O = 42 – 8,4 – 7,6 = 26

SiO_2 total = 168 + 78,4 = 246,4
SiO_2 reducido = 246,4x0,22 = 54,21
SiO_2 a escoria = 246,4 – 54,21 = 192,2
Si a arrabio = 54,21x28/60 = 25,4
O de este = 54,21 – 25,4 = 28,81

C a arrabio = 767,8x0,04 = 30,71
C a gas = 862,4 – 30,71 = 831,69

Peso y composición del arrabio (19-1)

Fe	= 767,80 ton. =	89,91%
Mn	= 21,70 ton. =	2,54%
P	= 8,40 ton. =	0,98%
Si	= 25,40 ton. =	2,97%
C	= 30,71 ton. =	3,60%
Total arrabio	= 854,01 ton. =	100,00%

Escoria:

Escoria = MnO + SiO_2 + CaO

62% de escoria = $MnO + SiO_2$ = 42 + 192,2 = 234,2 ton.

Escoria total = 234,2/0,62 = 378 ton.

CaO = 378 – 234,2 = 143,8
CaO del $CaCO_3$ = 143,8 – 7,6 = 136,2
$CaCO_3$ = 136,2x100/56 = 243,2
CO_2 de este = 243,2 – 136,2 = 107
C de este = 243,2x12/100 = 29,2
O de este = 243,2x32/100 = 77,8

Peso y composición de la escoria (19-1)

MnO	=	42,0 ton. =	11,11%
SiO_2	=	192,2 ton. =	50,85%
CaO	=	143,8 ton. =	38,04%
Total escoria	=	378,0 ton. =	100,00%

Gas (m^3):

Gas = $H_2O + CO + CO_2 + N_2$

Soplo = 4000x856 = 3'424.000
N_2 = 3'424.000x0,79 = 2'704.960
O_2 del soplo = 3'424.000x0,21 = 719040 m^3 = 1'027.200 Kg.
Total O = (262,6 + 33,6 + 6,3 + 26 + 28,81)x1000 + 1'027.200 = 1'384.310 Kg.

O →CO = 831,69x1000x16/12 = 1'108.800 Kg.
CO = 1'108.880x28/16 = 1'940.540 Kg.
Todo este CO no pasa al gas, sino que algo reacciona con el O y pasa a CO_2.
O →CO → CO_2 = 1'384.310 – 1'108.800 = 275430 Kg.
CO de este = 275430x28/26 = 482003 Kg.
CO a gas = 1'940.540 – 482.003 = 1'458.537 Kg. = 1'166.830 m^3

CO_2 a gas = 482003x44/28 + 107x1000 = 864633 Kg. = 440177 m^3

H_2O = (56 + 39,2)x1000x22,4/18 = 118471 m^3

Volumen y composición del gas (19-1):

H_2O	=	118.471 m^3 =	2,67%
CO	=	1'166.830 m^3 =	26,34%
CO_2	=	440.177 m^3 =	9,94%
N_2	=	2'704.960 m^3 =	61,05%
Total gas	=	4'430.438 m^3 =	100,00%

EJERCICIO N°20 (7)

Un alto horno procesa un mineral que contiene 75%Fe_2O_3 y 5%H_2O, produciendo un arrabio con 4%C y 92%Fe. Se utiliza una tonelada de coque por cada tonelada de arrabio producido, conteniendo el coque 90%C y 1%H_2O; se utilizan también 260 kilogramos de $CaCO_3$ por cada tonelada de arrabio.

El volumen del soplo es de 350 metros cúbicos, por tonelada de arrabio.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral procesado para producir una tonelada de arrabio.

2. El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas y encima de las toberas.

3. El volumen y composición del gas formado en las toberas, por tonelada de arrabio producido.

4. El volumen y composición del gas del horno.

5. El porcentaje de la potencia calorífica del coque que es desarrollada en el horno.

SOLUCION

1.

Fe en arrabio = Fe en mineral.

Fe en arrabio = 1000x0,92 = 920 Kg.
Fe en mineral = 75·(112/160) = 52,5%
Mineral = 920/0,525 = 1750 Kg. = 1,75 ton.

Peso del mineral = 1,75 toneladas/ton. de arrabio (20-1)

2.

Coque = 1000 Kg.
C en coque = 1000x0,9 = 900 Kg.

Todo el oxígeno del soplo se consume en las toberas, produciendo CO:

$2C + 0_2 = 2CO$

O_2 del soplo = 3250x0,21 = 682,5 m^3
C = 682,5·(24/22,4) = 731,25 Kg.
C en toberas = 731,25/900 = 0,8125

% del C del coque consumido en las toberas = 81,25 (20-2)

C en arrabio = 1000x0,04 = 40 Kg.
C del coque → gas = 900 – 40 = 860 Kg.
C quemado encima de toberas = 860 – 731,25 = 128,75 Jg.
C encima de las toberas = 128,75/900 = 0,143

%C quemado encima de las toberas = 14,30 (20-2)

3.

Gas formado en làs toberas = CO + N_2

Volumen y composición del gas formado en las toberas (20-3)

CO = 682,5x2 = 1365,0 m^3 = 34,71%
N_2 = 3250x0,79 = 2567,5 m^3 = 65,29%
Total gas en toberas = 3932,5 m^3 = 100,00%

4.

Gas del horno = CO + CO_2 + N_2 + H_2O

Debemos calcular el oxígeno que aporta el mineral reducido y el CO que reacciona con oxígeno para formar CO_2.

Fe_2O_3 = 1750x0,75 = 1312,5 Kg.
O de este = 1312,5 – 920 = 392,5 Kg.
O del soplo = 682,5·(32/22,4) = 975 Kg.
O total = 975 + 392,5 = 1367,5 Kg.

O → CO = 860·(16/12) = 1146,7 Kg.
CO total formado = 1146,7·(28/16) = 2006,7 Kg.

De este CO, una parte reacciona con O y forma CO_2, el resto forma parte del gas del horno.

$O \rightarrow CO \rightarrow CO_2$ = 1367,5 – 1146,7 = 220,8 Kg.
$CO \rightarrow CO_2$ = 220,8·(28/16) = 386,4 Kg.
$CO \rightarrow$ gas = 2006,7 – 386,4 = 1620,3 Kg. = 1296,24 m^3

CO_2 formado por el CO = 386,4·(44/28) = 607,2 Kg.
CO_2 del $CaCO_3$ = 260·(44/100) = 114,4 Kg.
CO_2 total en gas = 607,2 + 114,4 = 721,6 Kg. = 367,36 m^3

H_2O total = 1750x0,05 + 1000x0,01 = 97,5 Kg. = 121,33 m^3

Volumen y composición del gas de alto horno (20-4):

CO	= 1296,24 m^3 =	29,78%
CO_2	= 367,36 m^3 =	8,44%
H_2O	= 121,33 m^3 =	2,79%
N_2	= 2567,50 m^3 =	58,99%
Total gas	= 4352,43 m^3 =	100,00%

5.
P.C.B del coque = 8100x900 – 586x10 = 7'284.140 Kcal.

P.C.B del gas (CO) = 1296,24x3034 = 3'932.792 Kcal.

P.C.B del C del arrabio = 40x8100 = 324000 Kcal.

P.C.B del coque desarrollada = 7'284.140 – 3'932.792 – 324.000 = 3'027.348 Kcal.
P.C.B del coque desarrollada = 3'027.348/7'284.140 = 0,4156
P.C.B del coque desarrollada en el horno = 41,56% (20-5)

EJERCICIO Nº21 (7)

Un alto horno utiliza coque de la siguiente composición:

C	84%	H_2O	3%
H	2	R	10
O	1		

El horno produce 1 tonelada (1000 Kg.) de arrabio por cada tonelada de coque utilizado, y también utiliza 400 kilogramos de $CaCO_3$ en la carga, por tonelada de arrabio producido. El arrabio contiene 4% de carbono.

El análisis del gas al salir del horno fue el siguiente:

CO	28%	H_2	1%
CO_2	16	N_2	54
CH_4	1		

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producidos, por tonelada de arrabio.
2. La potencia calorífica del coque, por kilogramo.
3. El porcentaje de la potencia calorífica del coque que queda disponible en el gas.

SOLUCION

1.
Utilizamos la ecuación (1):

C en coque = 1000x0,84 = 840 Kg.
C en $CaCO_3$ = 400·(12/100) = 48 Kg.
C en arrabio = 1000x0,04 = 40 Kg.
C total en gas = 840 + 48 – 40 = 848 Kg.

Supongamos 1 m^3 de gas y calculemos la cantidad de C que contiene:

C en gas = (0,28 + 0,16 + 0,01)x12/22,4 = 0,241 Kg./m^3 de gas.

Gas = 848/0,241 = 3519 m^3

Gas producido = 3519 m^3/ton. de arrabio. (21-1)

2.
P.C.B = 8100C + 34000·(H – O/8) + 2200S – 586x(9H + W)

P.C.B = 8100x0,84 + 34000·(0,02 – 0,01/8) + 0 – 586x(9x0,02 + 0,03) = 7318,44 Kcal.

Potencia calorífica del coque = 7318 Kcal./Kg. (21-2)

3.
P.C.B del gas = CO + CH_4 + H_2

P.C.B del gas = 3034x0,28 + 8560x0,01 + 2582x0,01 = 960,94 Kcal./m^3

P.C.B del gas = 960,94x3519/1000x7318 = 0,462

P.C.B del gas = 46,2% de la del coque (21-3)

EJERCICIO Nº22 (7)

Un alto horno utiliza 2940 metros cúbicos de soplo por tonelada de arrabio producido, habiéndose precalentado este soplo a 560ºC en estufas que poseen una eficiencia térmica del 70%. Para realizar esto se requiere del 28% del gas producido por el alto horno, consistiendo este gas en CO, CO_2 y N_2 y conteniendo 1,9 partes de CO por 1 parte de CO_2.

La carga incluye 320 kilogramos de $CaCO_3$, por tonelada de arrabio producido. El arrabio contiene 4%C. El coque utilizado tiene 86%C.

PREGUNTAS

1. El volumen y composición del gas de alto horno, por tonelada de arrabio producido.
2. Los kilogramos de coque utilizados, por tonelada de arrabio.
3. Del carbono en el coque, que porcentaje:
   a. Sale del horno como CO.
   b. Es utilizado en las estufas como CO.
   c. Está disponible como CO para la generación de potencia.
   d. Es quemado en las toberas.

SOLUCION

1.
Precalentamiento del aire a 560ºC =
2940x(0,302 + 2,2x10^{-5}x560)x560 = 517496 Kcal.

Este calor es suministrado a una eficiencia térmica del 70%.
Calor total a estufas = 517496/0,7 = 739281 Kcal.

En el gas, el componente combustible es el CO.

Sea: X = fracción de CO en el gas.

Y = fracción deCO_2 en el gas.
Z = metros cúbicos de gas.

N_2 en gas = 2940x0,79 = 2322,6 m^3

El calor producido por el gas será = 3034X Kcal./m^3 de gas.

Los metros cúbicos de gas requeridos para producir el calor serán:

$$= \frac{739281}{3034X} = \frac{243,67}{X} \text{ m}^3 \text{ de gas}$$

El volumen ocupado por el 28% del gas = 0,28Z . Este es la cantidad de gas que produce el calor utilizado. ∴

$$0,28 = \frac{243,67}{XZ} \therefore Z = \frac{243,67}{0,28X} = \frac{870,24}{X}$$

En fracciones:

1 = 2322,6/Z + X + Y
Pero X/Y = 1,9 ∴ Y = X/1,9 = 0,5263X, así:
1 = 2322,6/Z + X + 0,5263X = 2322,6/Z + 1,5263X ∴
Z = 2322,6/(1 – 1,5263X)

Reemplazando:
870,24/X = 2322,6/(1 – 1,5263X) ∴
X = 0,2384 ∴

Gas = Z = 870,24/0,2384 = 3650,85 m^3

Volumen del gas de alto horno = 3650,85 m^3/ton. de arrabio (22-1)

Y = 0,2384/1,9 = 0,1255

Composición del gas de alto horno (22-1)

N_2 = 2322,6/3650,85 = 63,61%
CO = 23,84%
CO_2 = 12,55%

2.
C en gas = C en coque + C del $CaCO_3$

C en CO = 3650,85x0,2384·(12/22,4) = 466,27 Kg.
C en CO_2 = 3650,85x0,1255·(12/22,4) = 245,45 Kg.
C en $CaCO_3$ = 320x0,12 = 38,4 Kg.
C en arrabio = 1000x0,04 = 40 Kg.
C en coque = 466,27 + 245,45 + 40 – 38,4 = 713,32 Kg.

Coque = 713,32/0,86 = 829,44 Kg.

Coque utilizado = 829,44 Kg./ton. de arrabio. (22-2)

3.a.
C que sale del horno como CO = 466,27 Kg.
C que sale como CO = 466,27/713,32 = 0,654

C que sale del horno como CO = 65,4% (22-3.a)

3.b
C del coque utilizado en estufas = 466,27x0,28/713,32 = 0,183

C del coque utilizado en estufas = 13,8% (22-3.b)

3.c

C disponible = 466,27 – 466,27x0,28 = 335,71 Kg.

C disponible = 335,71/713,32 = 0,471

C del coque para generación de potencia = 47,1% (22-3.c)

3.d

Reacción en toberas:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO.$

Todo el oxígeno del soplo se consume en las toberas en la reacción anterior.

O_2 del soplo = 2940x0,21 = 617,4 m^3

C = 617,4·(12/11,2) = 661,5 Kg.

C del coque quemado en toberas = 661,5/713,32 = 0,927

C del coque quemado en las toberas = 92,7% (22-3.d)

EJERCICIO N°23 (7)

Un alto horno produce 400 toneladas cortas de arrabio por día, con la siguiente composición:

Fe	92,8%
Si	2,1
C	3,8
Mn	1,3

El análisis del mineral utilizado fue el siguiente:

Fe_2O_3	78,0%
SiO_2	8,2
Al_2O_3	4,2
MnO	4,5
H_2O	5,1

Como fundente se utilizó $CaCO_3$ puro, en una cantidad igual a un cuarto del peso del mineral. 5% del hierro cargado se pierde en la escoria.

Se utilizaron 2100 libras de coque por tonelada de arrabio y contenía 92%C. Los gases secos contenían 12%CO_2, 28%CO y 60%N_2. El aire fue precalentado a 700°C en estufas con una eficiencia térmica del 70%.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral utilizado, por tonelada de arrabio.
2. El volumen del gas producido (seco), por tonelada de arrabio.
3. El porcentaje del valor calorífico del coque que permanece en el gas.
4. El porcentaje del gas requerido por las estufas.
5. La potencia que puede ser generada por el gas remanente, a una eficiencia de conversión del 20%.

SOLUCION

1.

1 tonelada corta = 2000 libras.

Fe en arrabio = 2000x0,928 = 1856 libras
Fe total cargado = 1856/0,95 = 1953,7 libras.

Sea X = peso del mineral

Fe cargado en mineral = 0,78X·(112/160) = 0,546X

0,546X = 1953,7 ∴
X = 3578,2

Mineral cargado = 3578,2 libras/ton. de arrabio (23-1)

2.
Utilizando la expresión (1):

$CaCO_3$ = 3578,23(1/4) = 894,55 lbs.
C en $CaCO_3$ = 894,55x0,12 = 107,4 lbs.
C en coque = 2100x0,92 = 1932 lbs.
C en arrabio = 0,038x2000 = 76 lbs.
C total en gas = 1932 + 107,4 – 76 = 1963,4 lbs.

Asumimos 1 ft^3 de gas y determinamos su contenido de C:
C = (0,12 + 0,28)x12/359 = 0,01337 lbs./ft^3 de gas.

Gas = 1963,4/0,01337 = 146846 ft^3

Volumen del gas = 146846 ft^3/ton. de arrabio (23-2)

3.
P.C.B del coque = 14600C + 61000·(H – O/8) + 4000S – 1050x(9H +W)
P.C.B del coque = 14600x0,92 = 13432 BTU/lb.

Potencia calorífica del gas (CO) = 341x0,28 = 95,48 BTU/ft^3

Potencia calorífica del gas = 146846x95,48/2100x13432 = 0,497

Poder calorífico del gas = 49,7% del de coque (23-3)

4.
N_2 en gas seco = 146846x0,6 = 88107,6 ft^3
Soplo = 88107,6/0,79 = 111529 ft^3

1 ft^3 = 0,02832 m^3

Soplo = 111529x0,02832 = 3158,5 m^3

Contenido de calor en el soplo a 700°C:
= 3158,5x(0,302 + 2,2x10^{-5}x700)x700 = 701756 Kcal.

Potencia calorífica del gas = 0,28x3034 = 849,52 Kcal./m^3

Calor total del combustible suministrado a las estufas = 701756/0,7 = 1'002.509 Kcal.

Gas requerido por las estufas = 1'002.509 Kcal./849,52 (Kcal./m^3) = 1180 m^3
Gas seco = 146846x0,02832 = 4158,7 m^3
Gas requerido por las estufas = 1180/4158,7 = 0,2837

% de gas requerido por las estufas = 28,37 (23-4)

5.
Gas remanente = 4158,7 – 1180 = 2978,7 m^3

Potencia calorífica de este = 2978,7x0,28x3034 = 2'530.465 Kcal.

Esta potencia se refiere a 1 tonelada de arrabio, pero en 1 día se producen 400 toneladas.

Potencia calorífica = 2'530.465x400 = 1012'186.090 Kcal./día.
Potencia calorífica = 1012'186.090/24 = 24'174.420 Kcal./hr.

1 H.P = 641,8 Kcal./hr.

Potencia generada = 0,2x42'174.420/641,8 = 13143 H.P.
Potencia que puede generar el gas remanente a 20% de conversión = 13143 H.P (23-5)

EJERCICIO N°24 (7)

Un alto horno produjo arrabio de la siguiente composición:

C	3,9%
Mn	1,1
Si	2,1
Fe	92,9

El mineral tratado contenía:

Fe_2O_3	82%	MnO	4%
SiO_2	8	Al_2O_3	4
H_2O	2		

Se utilizó suficiente $CaCO_3$ para producir una escoria con 40% de CaO.

El coque contenía 88%C, 8%SiO_2, 1%Al_2O_3, 3%H_2O y se cargo en una cantidad de 950 kilogramos por tonelada de arrabio.

Los gases del horno contenían 29%CO, 13%CO_2 y 58%N_2 (análisis seco).

El soplo fue precalentado a 800°C en estufas con una eficiencia del 72%.

El gas no requerido por las estufas, fue utilizado para generar potencia en máquinas a gas a una eficiencia del 25%.

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de mineral tratado, por tonelada de arrabio producido, despreciando el hierro perdido en la escoria.
2. Los kilogramos de escoria producida, y los kilogramos de $CaCO_3$ requeridos.
3. Los metros cúbicos del gas de alto horno (incluyendo el H_2O).
4. Los metros cúbicos del soplo (seco).
5. La proporción de gas requerido por las estufas.
6. La potencia generada por el gas remanente, si el horno produce 1000 toneladas de arrabio por día.

SOLUCION

1.
Peso de Fe en arrabio = Peso de Fe en mineral
Fe en arrabio = 929 Kg.
Fe en Fe_2O_3 = Fe en mineral = 82·(112/160) = 57,4%
Mineral = 929/0,574 = 1620 Kg.

Peso del mineral = 1620 Kg./ton. de arrabio (24-1)

2.
Escoria = MnO + SiO_2 + Al_2O_3 + CaO.

MnO cargado = 1620x0,04 = 64,8 Kg.
Mn en arrabio = 1000x0,011 = 11 Kg.
MnO reducido = 11·(71/55) = 14,2 Kg.
MnO a escoria = 64,8 – 14,2 = 50.6 Kg.

Si en arrabio = 1000x0,021 = 21 Kg.
SiO_2 reducido = 21·(60/28) = 45 Kg.
SiO_2 cargado = 1620x0,08 + 950x0,08 = 205,6 Kg.
SiO_2 a escoria = 205,6 – 45 = 160,6 Kg.

Al_2O_3 cargado = Al_2O_3 a escoria = 1620x0,04 + 950x0,01 = 74,3 Kg.

60% escoria = MnO + SiO_2 + Al_2O_3
60% escoria = 50,6 + 160,6 + 74,3 = 285,5 Kg.

Escoria = 285,5/0,6 = 475 Jg.

Escoria producida = 475 Kg./ton. de arrabio (24-2)

CaO = 475 – 285,5 = 189,5 Kg.
$CaCO_3$ = 189,5·(100/56) = 339 Kg.

$CaCO_3$ requerido = 339 Kg./ton. de arrabio (24-2)

3.
Gas = CO + CO_2 + N_2 + H_2O

El cálculo del gas seco lo realizamos con la expresión (1):

C en arrabio = 1000x0,039 = 39 Kg.
C en coque = 0,88x950 = 836 Kg.
C en $CaCO_3$ = 330x0,12 = 40,68 Kg.
C → gas = 836 + 40,68 – 39 = 837,68 Kg.

Supongamos 1 m^3 de gas seco y determinemos la cantidad de C que contiene:

C en gas = (0,29 + 0,13)x12/22,4 = 0,225 Kg./m^3.

Gas seco = 837,68/0,225= 3723 m^3

H_2O total = (1620x 0,02 + 950x0,03)x22,4/18 = 77 m^3

Gas húmedo = 3723 + 77 = 3800 m^3

Volumen del gas húmedo = 3800 m^3/ton. de arrabio (24-3)

4.
N_2 del gas = N_2 del aire.

N_2 en gas seco = 3723x0,58 = 2159,34 m^3

Soplo = 2159,34/0,79 = 2730 m^3

Volumen del soplo = 2730 m^3/ton. de arrabio (24-4)

5.
Contenido de calor del aire a 800°C = 2730x(0,302 + 2,2x10^{-5}x800)x800 = 698006 Kcal.
Esto corresponde al 72% de eficiencia de las estufas.
Calor total = 698006/0,72 = 969450 Kcal.
Potencia calorífica del gas = 0,29x3034 = 880 Kcal./m^3 de gas.
Gas requerido = 969450 Kcal./880 (Kcal./m^3 de gas) = 1102 m^3
Gas requerido por estufas = 1102/3723 = 0,296

Gas requerido por estufas = 29,6% (24-5)

6.
Para 1000 toneladas de arrabio por día:

Gas seco = 3'723.000 m^3

Gas en estufas = 1'102.000 m^3

Gas remanente = 3'723.000 – 1'102.000 = 2'621.000 m^3

Valor calorífico de este = 2'621.000x880 = 2306'480.000 Kcal./día
Valor calorífico de este = 2306'480.000/24 = 96'000.000 Kcal/hr.

1 Kw-hr. = 860 Kcal.

Potencia generada = $0{,}25 \times 96 \times 10^6/860$ = 27900 Kw

Potencia generada por gas remanente = 27900 Kw. (24-6)

EJERCICIO N°25 (7)

El volumen del gas producido en un alto horno fue de 4200 metros cúbicos, por 1000 kilogramos de arrabio, y su composición fue la siguiente:

CO	28,7%	H_2	0,5%
CO_2	10,3	N_2	59,0
H_2O	1,5		

El horno produce 528 toneladas de arrabio por día con 4%C, utilizando 70 toneladas de piedra caliza ($CaCO_3$).

El coque utilizado contiene 85%C.

El soplo es precalentado a 700°C en estufas que trabajas con una eficiencia térmica del 65%.

El gas no utilizado en las estufas, es utilizado en máquinas a gas que operan a una eficiencia neta del 22%.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de soplo utilizados, por tonelada de arrabio producido.
2. Los kilogramos de coque utilizados, por tonelada de arrabio.
3. El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas.
4. La potencia calorífica del gas, por metro cúbico.
5. El porcentaje del gas total que es utilizado en las estufas.
6. La potencia generada por las máquinas a gas.

SOLUCION

1.

N_2 en gas = N_2 en soplo.

N_2 en gas = 4200x0,59 = 2478 m^3

Soplo = 2478/0,79 = 3136,7 m^3

Soplo = 3136,7 m^3/ton. de arrabio (25-1)

2.

C en gas = C en coque + C en $CaCO_3$ – C en arrabio.

Para 1 tonelada de arrabio de arrabio:

$CaCO_3$ = (70/528)x1000 = 132,6 Kg.
C en esta = 132,6x0,12 = 15,9 Kg.

CO = 4200x0,287 = 1205,4 m^3

C en este = 1205,5·(12/22,4) = 646 Kg.

CO_2 = 4200x0,103 = 432,6 m^3
C en este = 432,6·(12/22,4) = 231,75 Kg.

C en arrabio = 1000x0,04 = 40 Kg.

C en coque = 231,75 + 646 – 15,9 = 901,85 Kg.

Coque = 901,85/0,85 = 1061 Kg.

Coque = 1061 Kg./ton. de arrabio. (25-2)

3.
Reacción en las toberas:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$

O_2 del soplo = 3140x0,21 = 659,4 m^3
C = 659,4x12/11,2 = 706,5 Kg.

C quemado en las toberas = 706,5/901,85 = 0,7834

C del coque quemado en las toberas = 78,34% (25-3)

4.
Potencia calorífica del gas = $CO + H_2$

P.C.B del gas = 3034x0,287 + 2582x0,005 = 884 Kcal

Potencia calorífica del gas = 884 Kcal./m^3 (25-4)

5.
Precalentamiento del aire a 700°C = 3140x(0,302 + 2,2x10^{-5}x700)x700 = 697645 Kcal.

Este es el calor útil en las estufas que trabajaron con un 65% de eficiencia:

Calor total en estufas = 697645/0,65 = 1'073.300 Kcal.

Volumen de gas requerido en las estufas = 1'073.300 Kcal./884 (Kcal./m^3) = 1214 m^3

Gas requerido en estufas = 1214/4200 = 0,289

Gas requerido en estufas = 28,9% del total (25-5)

6.
Gas remanente = 4200 – 1214 = 2986 m^3/ton. de arrabio.
Gas remanente total = 2986x528 = 1'576.608 m^3/día
Contenido de calor de este = 1'576.608 m^3/día.x884 Kcal./m^3 = 1393'721.472 Kcal./día
Contenido de calor de este = 1393'721.742/24 = 58'000.000 Kcal./hr.

1 Kilovatio – hora = 860 Kilocalorías.
Potencia generada = 0,22x(58'000.000/860) = 14856 Kw.

Potencia generada en máquinas a gas = 14856 Kilovatios (25-6)

EJERCICIO N°26 (7)

PREGUNTAS

Calcular la temperatura teórica en la zona de fusión de un alto horno, bajo tres condiciones hipotéticas, como sigue:

1. El soplo no es calentado (asumir 0°C).
2. El soplo es calentado a 700°C.

3. El soplo es de aire enriquecido, conteniendo 30%O_2, no calentado.

En cada caso, asumir que el coque es precalentado por los gases calientes ascendentes a la temperatura teórica de combustión, antes de quemarlo. Despreciar la humedad del soplo.

SOLUCION

1.
Supongamos cualquier cantidad de soplo, por ejemplo 100 m^3.

$O_2 = 21\ m^3$, $N_2 = 79\ m^3$

Reacción en las toberas:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$.

$CO = 2\ O_2 = 21x2 = 42\ m^3$
$C = 42x12/22,4 = 22,5$ Kg.

Calor disponible = Potencia calorífica + calor por precalentamiento del C = calor en productos de combustión.

Potencia calorífica ($C \rightarrow CO$) = 22,5x2430 = 54675 Kcal.

El calor específico del C (0 a 2000°C) = 0,430

Precalentamiento del C = $22,5x0,43 \cdot t = 9,675t$

Calor disponible = $54675 + 9,675t$

Productos de combustión = $N_2 + CO = 79 + 42 = 121\ m^3$

Contenido de calor en productos de combustión = $121 \cdot (0,302 + 2,2x10^{-3}t) \cdot t$
$= 36,542\ t + 2,662x10^{-3}t^2$

Igualando:

$54675 + 9,675t = 36,542 + 2,662x10^{-3}t^2$

Resolviendo para t:

$t = 1736°C$

Temperatura teórica en la zona de fusión = 1736°C (26-1)

2.
Calentamiento del soplo a 700°C = $100x(0,302 + 2,2x10^{-5}x700)x700 = 22218$ Kcal.

En las vecindades de 2000°C, el calor específico del C = $0,20 + 0,00011\ t$

Calentamiento del C = $22,5x(0,20 + 0,00011\ t) \cdot t = 4,5\ t + 2,475x10^{-3}\ t^2$

Calor disponible = $54675 + 22218 + 4,5\ t + 2,475x10^{-3}\ t^2 = 36,542\ t + 2,662x10^{-3}\ t^2$ ∴
$1,87x10^{-4}\ t^2 + 32,042\ t - 76893 = 0$ ∴

$t = 2367°C$

Temperatura teórica en la zona de fusión = 2367°C (26.-2)

3.
En este caso: soplo = 100 m^3 ($N_2 = 100x0,7 = 70\ m^3$; $O_2 = 30\ m^3$).

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$: $CO = 2 O_2 = 60\ m^3$

$C = 60x12/22,4 = 32,14$ Kg.

Productos de combustión $= CO + N_2 = 70 + 60 = 130\ m^3$

Potencia calorífica del C = 32,14x2430 = 78100,2 Kcal.

Precalentamiento del $C = 32,14x(0,20 + 0,00011\ t) \cdot t = 6,428\ t + 3,5354x10^{-3}\ t^2$

Calor disponible $= 78100 + 6,428\ t + 3,5354x10^{-3}\ t^3$

Calor en productos de combustión $= 130x(0,302 + 2,2x10^{-3}\ t(\cdot t = 39,26\ t + 2,86x18^{-3}\ t^2 \therefore$

Igualando: $6,754x10^{-4}\ t^2 - 32,832\ t + 78100 = 0 \therefore$

t = 2508°C

Temperatura teórica en la zona de fusión = 2508°C (26.3)

EJERCICIO N°27 (7)

Un alto horno utiliza 3250 metros cúbicos de soplo por tonelada de arrabio producido. El soplo es precalentado a 600°C en estufas que trabajan con una eficiencia térmica del 60%. El horno produce 500 toneladas de arrabio por día.

El gas de alto horno que no es utilizado por las estufas, se utiliza para producir potencia, siendo la mitad quemado en calderas a una eficiencia térmica del 70% y la otra mitad utilizado directamente en máquinas a gas a una eficiencia del 25%. La composición del gas de alto horno es la siguiente:

CO	24,5%	H_2O	2,8%
CO_2	13,4	N_2	59,3

Asumir que el carbono del coque es precalentado a la temperatura de las toberas antes de ser quemado.

PREGUNTAS

1. El porcentaje del gas total que es quemado en las etufas.
2. Los caballo – caldera de potencia desarrollados en la caldera.
3. Los caballos de fuerza desarrollados en las máquinas a gas.
4. La máxima temperatura teórica en las toberas.

SOLUCION

1.

El volumen del gas utilizado en las estufas, se deduce a partir del calor utilizado en ellas para calentar el aire a una temperatura determinada, que en este caso es de 600°C.

N_2 en aire = N_2 en gas.

$N_2 = 3250x0,79 = 2567,5\ m^3$/ton. de arrabio.
N_2 total $= 2567,5x500 = 1'283.750\ m^3$.

Gas total $= 1'283.750/0.593 = 2'164.839\ m^3$

Aire total $= 3250x500 = 1'625.000\ m^3$.

Contenido de calor del aire en estufas a 600°C $= 1'625.000\cdot(0,302 + 2,2x10^{-5}x600)x600$
$= 307'320.000$ Kcal.

Calor total en estufas = 307'320.000/0,6 = 512'200.000 Kcal.

Potencia calorífica del gas = 3034x0,245 = 743 Kcal./m^3

Gas requerido por estufas = 512'200.000 Kcal./743 Kcal./m^3 de gas = 689368 m^3

Gas requerido por estufas = 689368/2'164.839 = 0,319

Gas requerido por estufas = 31,9% del total (27-1)

2.

Gas remanente = 2'164.839 – 689.368 = 1'475.471 m^3/día

Gas quemado en calderas = 1'475.471x0,5 = 737.736 m^3/día

Potencia calorífica de este gas = 737736 m^3 x 734 Kcal./m^3 = 548'137.105 Kcal./día.
= 548'137.105/1440 = 380650 Kcal./min.

1 caballo – caldera = 140,7 Kcal./min.

Caballo – caldera desarrollados = 0,7x(830650/140,7) = 1890

Potencia desarrollada en la caldera = 1890 caballo – caldera. (27-2)

3.

Potencia calorífica del gas en las máquinas a gas = 548'137.105 Kcal./día. = 548'137.105/24 =
= $2{,}29x10^7$ Kcal./hr.

1 H.P = 640 Kcal./hr.

Potencia desarrollada en máquinas a gas = $0{,}25x2{,}29x10^7/640$ = 8920 H.P.

Potencia desarrollada en máquinas a gas = 8920 H.P (27-3)

4.

Reacción en las toberas:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$:

O_2 = 1'625.000x0,21 = 341250 m^3
$CO = 2\ O_2$ = 682500 m^3
C = 682500x12/22,4 = 365625 Kg.

Productos de combustión = $CO + N_2$ = 682500 + 1'625.000x0,79 = 1'966.250 m^3.

El calor en los productos de combustión = potencia calorífica del C + percalentamiento del aire + precalentamiento del C..

Precalentamiento del aire = $1'625.000x(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x600)x600$ = 307'320.000 Kcal.
Potencia calorífica de $C \rightarrow CO$ = 365625x2430 = 888'468.750 kcal.
En la vecindad de los 2000ºC, el calor específico del C = 0,20 + 0,00011 t

En el proceso de alto horno, para efectos de cálculos, normalmente se asume para el coque, que la temperatura incógnita t = t – 300ºC (7, pag. 104):

Precalentamiento del C = 365625x[0,20 + 0,00011(t – 300)]x(t – 300)
= 48993,75 t + 40,2 t^2 – 18'317.812.5

Calor disponible = 307'320.000 + 888'468.750 + 48993,75 t + 40,2 t^2 – 18'317.812.5
= 1177'470.938 + 48993,75 t + 40,2 t^2

Calor en productos de combustión $(CO + N_2)$ = 1'966.250x$(0,302 + 2,2x10^{-5}\ t) \cdot t$
$= 593807,7\ t + 43,2575\ t^2$

Igualando:

$1177'470.938 + 48993,75\ t + 40,2\ t^2 = 593807,7\ t + 43,2575\ t^2$

Resolviendo para t, encontramos que t = 2135,3°C

Temperatura máxima teórica en las toberas = 2135,3°C (27-4)

EJERCICIO N°28 (7)

Un alto horno utiliza un soplo precalentado a 600°C. El época húmeda el aire contiene 5% de vapor de agua. Esta es descompuesta al entrar al horno de acuerdo a la siguiente reacción:

$$H_2O + C = CO + H_2$$

Asumir que el carbono que se quema en la zona de toberas se encuentra a la temperatura máxima de los gases.

PREGUNTAS

1. La temperatura teórica máxima de los gases en la zona de toberas, cuando el soplo está seco.
2. Lo mismo, cuando el soplo contiene 5% de humedad.
3. La relación de cambio en la energía de fusión en los dos casos.

SOLUCION

1.
Calor disponible = Potencia calorífica + precalentamiento del aire + precalentamiento del coque = Calor en productos de combustión.

Asumo 100 m³ de aire seco ($N_2 = 79\ m^3$, $O_2 = 21\ m^3$).

Reacción en toberas: $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$: CO = 2x0,21 = 42 m³: C = 42x12/22,4 = 22,5 Kg.

Productos de combustión = $CO + N_2$ = 79 + 42 = 121 m³

Precalentamiento del aire = $100x(0,302 + 2,2x10^{-5}x600)x600$ = 18912 Kcal.

Potencia calorífica del $C \rightarrow CO$ = 22,5x2430 = 54675 Kcal.

El calor específico del C (0°C a 2500°C) = $0,206 + 1,78x10^{-4}t - 3,3x10^{-8}\ t^2$, para t = 2500°C, el calor específico será = 0,44475 Kcal./Kg./grado.
Calor disponible = 18912 + 54675 + 22,5x0,44475 t = 73587 + 10,007 t

Calor en productos de combustión $(CO + N_2)$ = $121x(0,302 + 2,2x10^{-5}t) \cdot t =$
$= 36,542\ t + 2,662x10^{-3}\ t^2$

Igualando:
$73587 + 10,007\ t = 36,542\ t + 2,662x10^{-3}\ t^2 \therefore$

t = 2260°C

Temperatura máxima teórica de los gases (aire seco) = 2260°C (28-1)

2.

Si el aire contiene 5% de humedad:

Asumimos 100 m^3 de aire húmedo:

$H_2O = 5\ m^3$, N_2 $95x0,79 = 75,05\ m^5$; $O_2 = 95x0,21 = 19,95\ m^3$.

Reacción de descomposición del agua:

$H_2O + C = CO + H_2$

$CO = 5\ m^3$; $H_2 = 5\ m^3$; $C = 5\cdot(12/22,4) = 2,679$ Kg.

Reacción en toberas:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$:

$O_2 = 19,95\ m^3$; $CO = 2x19,95 = 39,9\ m^3$; $X = 39,9x12/22,4 = 21,375$ Kg.

C total = 21,375 + 2,679 = 24,054 Kg.
CO total = 5 + 39,9 = 44,9 m^3
$CO + N_2 = 44,9 + 75,05 = 119,95\ m^3$

Precalentamiento del aire seco = $95x(0,302 + 2,2x10^{-5}x600)x600 = 17966,4$ Kcal.
Precalentamiento del agua = $5x(0,373 + 5x10^{-5}x600)x600 = 1209$ Kcal.

El calor específico del C en las vecindades de 2000°C = $0,206 + 1,78x10^{-4}t - 3,3x10^{-8}\ t^2$, cuando t se convierte en una incógnita, el término t^2 de este calor específico genera una ecuación cúbica; para evitar lo cual se acostumbra a darle a una de las t's el valor de 2000 convirtiendo así el calor específico en 0,206 + 0,00011 t. (7, pag. 105)
Precalentamiento del C = $24,054x(0,206 + 1,78x10^{-4}\ t - 3,3x10^{-8}x2000\ t)\cdot t =$
$= 4,9551\ t + 2,694x10^{-3}\ t^2$

Potencia calorífica del C $\rightarrow$ CO = 24,054x2430 = 58451 Kcal.

Calor disponible = $17966 + 1209 + 58451 + 4,9551\ t + 2,694x10^{-3}\ t^2$
$= 77626 + 4,9551\ t + 2,694x10^{-3}\ t^2$.

A este calor hay que restarle el utilizado en descomponer el agua = 3210 Kcal./Kg.
$H_2O = 5x18/22,4 = 4,02$ Kg.

Calor de descomposición del agua = 4,02x3210 = 12904,2 Kcal.

Calor disponible = $77626 + 4,9551\ t + 2,694x10^{-3}\ t^2 - 12904$
$= 64722 + 4,9551\ t + 2,694x10^{-3}\ t^2$

Contenido de calor en productos de combustión:

$CO + N_2 = 119,95x(0,302 + 2,2x10^{-5}\ t)\cdot t =$
$H_2 = 5x(0,301 + 2x10^{-5}\ t)\cdot t$ =
$\Sigma = 37,7299\ t + 2,7389x10^{-3}\ t^2$

Igualando:
$64722 + 4,9551\ t + 2,694x10^{-3}\ t^2 = 37,7299\ t + 2,7389x10^{-3}\ t^2\ \therefore$

t = 1970°C

Temperatura máxima teórica con el aire húmedo = 1970°C (28-2)

3.

Si de acuerdo a la definición de Johnson, elegimos 1500°C como la *temperatura crítica* , a la cual hay fácil fluencia de la escoria (7), el *cambio en el poder de fusión* viene dado por t_i – 1500, siendo t_i la temperatura correspondiente al contenido de calor de los gases productos de la combustión.

La relación de cambio que se solicita, será=

$$1-\frac{1970-1500}{2260-1500}=0{,}381=38{,}1\%$$

Relación de cambio en el poder de fisión = 38,1% (28-3)

EJERCICIO N°29 (7)

Un alto horno para hierro utiliza un soplo, el cual a la entrada a las estufas tiene una presión de 1,6 atmósferas (manómetro) y una temperatura de 45°C; y está saturado con vapor de agua. Las estufas lo calientan a 700°C.

Se asume que el carbono del coque, justo antes de ser consumido por el soplo, ha alcanzado una temperatura 300°C menor que la temperatura de los gases productos de la combustión.

PREGUNTAS

1. La temperatura teórica máxima en la zona de fusión del horno.
2. La temperatura si el soplo fuera secado completamente.
3. La temperatura si el soplo no fuera ni secado ni precalentado, entrando al horno a 0°C.

SOLUCION

1.

Calor disponible = Potencia calorífica del combustible + Contenido de calor por precalentamientos = Contenido de calor en los productos de combustión.

Partamos de 100 m^3 de aire seco.

A 45°C la presión de saturación con agua = 71,9 mm
Presión de aire húmedo = 1,6x760 = 1216 mm
Presión de aire seco = 1216 – 71,9 = 1144,1 mm

Volumen de H_2O = 100x71,9/1144,1 = 6,284 m^3 = 5,05 Kg.

Aire húmedo = 100 + 6,286 = 106,284 m^3: O_2 = 21 m^3, N_2 = 79 m^3, H_2O = 6,284 m^3

Reacciones:

En toberas: $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$:
CO = 2 O_2 = 42 m^3; C = 42x12/22,4 = 22,5 Kg.

Descomposición del agua: $H_2O + C = CO + H_2$:
CO = 6,284 m^3; H_2 = 6,284 m^3; C = 6,284x12/22,4 = 3,366 Kg.

C total = 22,5 + 3,366 = 25,866 Kg.

Productos de combustión:
CO total + N_2 = 42 + 6,284 + 79 = 127,284 m^3
H_2 = 6,284 m^3

Contenido de calor por precalentamientos:
Aire seco = $100x(0,302 + 2,2x10^{-5}x700)x700 = 22218$ Kcal.
$H_2O = 6,284x(0,373 + 5x10^{-5}x700)x700 = 1795$ Kcal.
Potencia calorífica del $C \rightarrow CO = 25,866x2430 = 62854,4$ Kcak
Precalentamiento del $C = 25,866x[0,206 + 0,000112\cdot(t-300)] \cdot (t-300)$
$= 3,5962\ t + 2,8967x10^{-3}\ t^2 - 1337,5$

Calor de descomposición del $H_2O = 5,05x3210 = 16210,5$ Kcal.

Calor disponible $= 22218 + 1795 + 62854,4 - 16210,5 - 1337,5 + 3,5962\ t + 2,8967x10^{-3}t^2$
$= 69319,4 + 3,5962\ t + 2,8967x10^{-3}\ t^2$

Contenido de calor en productos de combustión a cualquier temperatura:
$CO + N_2 = 127,284x(0,302 + 2,2x10^{-5}\ t) \cdot t = 38,4398\ t + 2,8x10^{-3}\ t^2$
$H_2 = 6,284x(0,301 + 2,0x10^{-5}\ t) \cdot t \qquad = \underline{1,8915\ t + 1,2568x10^{-4}\ t^2}$
Total calor en productos de combustión $= 40,3313\ t + 2,926x10^{-3}\ t^2$

Igualando el calor disponible con el calor en los P.C y despejando "t":

$2,93x10^{-5}\ t^2 + 36,7351\ t - 69319,4 = 0\ \therefore$
$t = 1884°C$

Temperatura máxima en zona de fusión = 1884°C (29-1)

2.
Si el soplo es secado completamente:

Soplo = 100 m^3: $O_2 = 21\ m^3$; $N_2 = 79\ m^3$.

Reacción en toberas: $C + ½\ O_2 = CO$:
$CO = 42\ m^3$; $C = 22,5$ Kg.

Productos de combustión: $CO + N_2 = 42 + 79 = 121\ m^3$

Precalentamiento del soplo = 22218 Kcal.
Potencia calorífica del $C \rightarrow CO = 22,5x2430 = 54675$ Kcal.
Precalentamiento del $C = (3,5962\ t + 2,8967x10^{-3}\ t^2 - 1337,5)x22,5/25,866$
$= 3,1282\ t + 2,52x10^{-3}\ t^2 - 1163,4$

Sumando los términos anteriores, encontramos el calor disponible:
$= 75730 + 3,1282\ t + 2,52x10^{-3}\ t^2$

Calor en productos de combustión:
$CO + N_2 = 121x(0,302 + 2,2x10^{-5}\ t) \cdot t = 36,542\ t + 2,662x10^{-3}\ t^2$

Igualando el calor disponible y los productos de combustión y luego despejando y ordenando obtendremos:

$1,42x10^{-4}\ t^2 + 33,4138\ t - 75730 = 0\ \therefore$

$t = 2245°C$
Temperatura máxima en la zona de fusión cuando el soplo está seco = 2245°C (29-2)

3.
A 0°C, la presión de saturación del agua = 4,9 mm
Presión de aire seco = 1216 – 4,9 = 1211,1 mm

Volumen de $H_2O = 100x4,9/1211,1 = 0,405\ m^3$

Descomposición del agua: $H_2O + C = CO + H_2$:
$CO = H_2 = 0{,}405\ m^3$; $C = 0{,}405x12/22{,}4 = 0{,}217$ Kg.

C total = 22,5 + 0,217 = 22,717 Kg.
CO total + N_2 = 79 + 0,405 + 42 = 121,405 m^3

Potencia calorífica del C $\rightarrow$ CO = 22,717x2430 = 55202,31 Kg.
Calor de descomposición del $H_2O = 0{,}405x(18/22{,}4)x3210 = 1044{,}7$ Kcal.
Precalentamiento del C = $(3{,}5962\ t + 2{,}8967x10^{-3}\ t^2 - 1337{,}5)\ x22{,}717/25{,}866$
$= 3{,}1584\ t + 2{,}544x10^{-3}\ t^2 - 1174{,}7$

Contenido de calor en los productos de combustión:
$N_2 + CO = 121{,}405x(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}\ t) \cdot t =$
$H_2 = 0{,}405\ x\ (0{,}301 + 2{,}0x10^{-5}\ t) \cdot t =$
$\Sigma = 36{,}7862\ t + 2{,}679x10^{-3}\ t^2$

Sumando el calor aportado, al cual se le ha restado el calor de descomposición del agua, e igualando con el contenido de calor en los productos de combustión, cancelando términos y despejando, obtendremos:

$1{,}35x10^{-4}\ t^2 + 33{,}6278\ t - 52983 = 0\ \therefore$

t = 1566°C

Temperatura máxima en la zona de fusión = 1566°C (29-3)

EJERCICIO N°30 (7)

Los siguientes datos fueron tomados de un alto horno que produce 600 toneladas de arrabio diariamente:

MINERAL (%)		COQUE (%)		FUNDENTE (%)		GAS HECHO (%)		ARRABIO HECHO (%)	
Fe_2O_3	90	C	86	SiO_2	5	CO	24	Si	1,4
SiO_2	5	SiO_2	6	$CaCO_3$	75	CO_2	12	C	3,6
Al_2O_3	3	Al_2O_3	5	$MgCO_3$	20	H_2	2	Fe	95,0
CaO	1	CaO	1			CH_4	2		
H_2O	1	MgO	1			N_2	60		
		H	1						

La escoria producida contiene 45% CaO + MgO. Se utilizaron 0,9 toneladas de coque por tonelada de arrabio producido. Después del suministrado a las estufas, el gas remanente se utilizó en máquinas a gas con una eficiencia termomecánica de 25% y generó 17340 Kw. La temperatura del soplo fue de 700°C y su presión de 1,3 atmósferas (barómetro).

Asumir que el calor específico del coque es el mismo que el del carbono puro. Asumir que el H_2 libre y el H_2 del CH_4, provienen del H del coque y de la descomposición del H_2O del soplo por carbono.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral utilizado, por tonelada de arrabio.
2. El peso del fundente utilizado, por tonelada de arrabio.
3. El peso de la escoria producida, por tonelada de arrabio.
4. El volumen del gas producido (seco), por tonelada de arrabio.
5. El volumen del soplo utilizado (incluyendo la humedad), por tonelada de arrabio.
6. La eficiencia térmica de las estufas.
7. La presión parcial del vapor de agua en el soplo, y el número de galones de agua que entran al horno por minuto en el soplo.

8. El porcentaje del calor generado por la combustión del carbono en las toberas, que es absorbido por la descomposición del H_2O.

9. El ahorro en toneladas de coque diariamente, por remoción del 70% de este vapor de H_2O.

10. La disminución de la temperatura en las toberas, producida por el vapor de agua.

SOLUCION

1.

Peso de Fe en mineral = Peso de Fe en arrabio.

Fe en arrabio = 1000x0,95 = 950 kg.
Fe en Mineral = 90x112/160 = 63%

Mineral = 950/0,63 = 1510 Kg.

Peso del mineral = 1510 Kg./ ton de arrabio (30-1)

2.

El peso del fundente debe calcularse en forma simultanea con el de la escoria, utilizando para ello el *método algebraico.*

Sea: X = peso de la escoria; Y = peso del fundente.

Escoria = CaO + MgO + SiO_2 + Al_2O_3:

CaO en mineral = 1510x0,01 = 15,1 Kg.
CaO en coque = 900x0,01 = 9 Kg.
CaO en fundente = 0,75Y x (56/100) = 0,42Y
CaO a escoria = 15,1 + 9,0 + 0,42Y = 24,1 + 0,42Y

MgO en coque = 900x0,01 = 9 Kg.
MgO en fundente = 0,2Y x (40/84) = 0,0951Y
MgO a escoria = 9 + 0,0951Y

Como CaO + MgO = 45% de la escoria, formularemos la siguiente ecuación:

0,45X = 24,1 + 0,42Y + 9 + 0,0951Y = 33,1 + 0,5151Y
(1) 0,45X = 33,1 + 0,5151Y

SiO_2 en mineral = 1510x0,05 = 75,5 Kg.
SiO_2 en coque = 900x0,06 = 54 Kg.
SiO_2 en fundente = 0,05Y
SiO_2 reducido = 1000x0,014x60/28 = 30 Kg.
SiO_2 a escoria = 75,5 + 54 + 0,05Y – 30 = 99,5 + 0,05Y

Al_2O_3 a escoria = 1510x0,03 + 900x0,05 = 90,3 Kg.

0,55X = 99,5 + 90,3 + 0,05Y = 189,8 + 0,05Y
(2) 0.55X = 189,8 + 0,05Y

Disponemos del siguiente sistema de ecuaciones:

(1) 0,45X = 33,1 + 0,5151Y
(2) 0,55X = 189,9 + 0,05Y

Resolviendo el sistema de ecuaciones, tendremos:

Y = fundente = 257 Kg.

Peso del fundente = 257 Kg./ton de arrabio (30-2)

3.
Del sistema de ecuaciones anterior:

X = escoria = (189,9 + 0,05x257)/0,55 = 368,63 Kg.
Peso de la escoria = 368,63 Kg./ton. de arrabio (30-3)

4.
Aplicaremos la expresión (1):

C en coque = 900x0,86 = 774 Kg.
C en $CaCO_3$ = 257x0,75x0,12 = 23,13 Kg.
C en $MgCO_3$ = 257x0,2x12/84 = 7,35 Kg.
C en arrabio = 1000x0,036 = 36 Kg.

C total en gas = 774 + 23,13 + 7,35 – 36 = 768,48 [illegible]

Veamos la cantidad de C que contiene 1 [illegible] gas:

C en gas = (0,24 + 0,12 + 0,02) x [illegible] = 0,204 Kg./m^3 de gas.

Gas = 768,48/0,204 = 3[illegible] **Volumen de gas = 3770 m^3/ ton. de arrabio** (30-4)

5. [illegible] x 0,6 = 2262 m^3
N_2 en [illegible] 2262/0,79 = 2864 m^3
A[illegible]
[illegible]mos que parte del H_2 en el gas, proviene de la descomposición de la humedad:

H_2 libre = 3770x0,02 = 75,4 m^3
H_2 del CH_4 = 3770 x 0,02 x 2 = 150,8 m^3
H_2 en coque = 9 x 22,4/2 = 100,8 m^3
H_2 de descomposición del H_2O = 75,4 + 150,8 – 100,8 = 125,4 m^3

$H_2 + ½ O_2 = H_2O$: $H_2 = H_2O$ = 125,4 m^3

Soplo húmedo = 2864 + 125,4 = 2990 m^3
Volumen del soplo húmedo = 2990 m^3 (30.5)

6.
Para este cálculo, procedemos así:

Precalentamientos en estufas a 700°C de:

Aire seco = 2864 x 600 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 700) x 700 = 381'794.112 Kcal.
Humedad = 125,4 x 600 x (0,373 + 5x10^{-5} x 700) x 700 = 21'488.544 Kcal.
Total calor por precalentamientos = 403'282.656 Kcal./día.

Potencia calorífica del gas = CO + H_2 + CH_4
P.C.B del gas = 0,24x3034 + 0,02x2582 + 0,02x8560 = 951 Kcal./m^3 de gas.

Vamos a encontrar la cantidad de gas y por tanto el calor que salió de las estufas y entró a las máquinas a gas donde se operó con 25% de eficiencia térmica:

860 Kcal./hr = 1 Kw
X = 17340

Calor generado en las máquinas a gas = 860x17340 = 14'912.400 Kcal. / hr
Total calor contenido en el gas = 14'912.400/0,25 = 59'649.600 Kcal./hr.
Al día fueron = 59'649.600 x 24 = 1431'590.400 Kcal./día.

El gas que entró a las máquinas = 1431'590.400 / 951 = 1'505.353 m^3 / día.

Gas total producido = 3770 x 600 = 2'262.000 m^3 / día

Gas requerido por las estufas = 2'262.000 – 1'505.353 = 756.647 m^3 / día

Calor de este gas = 756647 x 951 = 719'571.297 Kcal. / día.

Eficiencia térmica de las estufas = 403'282.656 / 719'571.297 = 0,56 = 56%

Eficiencia térmica de las estufas = 56% (30-6)

7.

Presión del soplo = 1,3x760 = 988 mm
Volumen de aire seco = 2864 m^3
Volumen da H_2O = 125,4 m^3

$$2864x\frac{P_{H_2O}}{988 - P_{H_2O}} = 125,4 \therefore$$

P_{H2O} = 41,4 mm

Presión parcial del vapor de agua en el soplo = 41,4 mm (30-7)

1 galón británico = 4,5996 litros.

Volumen de agua = 125,4 x 600 = 75240 m^3/día.

$$V_{H_2O} = 75240\frac{m^3}{día}x\frac{1000\text{ lts}}{1\text{ m}^3}x\frac{1\text{ galón}}{4{,}5996\text{ lts}}x\frac{1\text{ día}}{24\text{ hr}}x\frac{1\text{ hr}}{60\text{ min}} = 11360$$

Volumen de agua = 11360 galones / min. (30-7)

8.

En las toberas: C + ½ O_2 = CO
O_2 del soplo = 2864x600x0,21 = 360864 m^3
C de este = 360864 x 12 / 22,4 = 386640 Kg.

Calor de combustión C → CO = 2430x386640 = 936'535.200 Kcal.
Calor de descomposición del agua = 3210 x 125,4 x 600 x 18/22,4 = 194'078.893 Kca.
Calor de descomposición = 194'078.893 / 936'535.200 = 0,207

Calor de descomposición = 20,7% (30-8)

9.

H_2O removida = 125,4 x 600 x 0,7 x (18/22,4) = 42322,5 Kg.

Calor necesario para descomponer esta = 43322,5 x 3210 = 135'855.225 Kcal.

C ahorrado = 135'855.225 / 2430 x 1000 = 55,91 ton.

C ahorrado = 55,91 ton (30-9)

Coque ahorrado = 55,91/0,86 = 65,0 ton.

Coque ahorrado = 65,0 ton. (30-9)

10.

Debemos calcular la temperatura en las toberas con y sin vapor de agua en el soplo, para luego establecer la diferencia.

Calor disponible = calor en productos de combustión.

Con vapor de agua:

Calor disponible = precalentamiento del agua + precalentamiento del aire soco + potencia calorífica del C – calor de descomposición del agua.

Precalentamiento del aire seco = 381'794.112 Kcal.
Precalentamiento del agua = 21'488.544 Kcal.

Reacciones:

(1) $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$
(2) $C + H_2O = CO + H_2$

$O_2 = 2864x0,21x600 = 360864\ m^3$
$N_2 = 2864x0,79x600 = 1'375.536\ m^3$
$H_2O = 125,4x600 = 75240\ m^3$

Reacción (1): $CO = 2\ O_2 = 721728\ m^3$; C = 360864x12/11,2 = 386640 Kg.

Reacción (2): $CO = H_2 = 75240\ m^3$; C = 75240x12/22,4 = 40307 Kg.

CO total = 721728 + 75240 = 796968 m^3
C total = 386640 + 40307 = 426947 Kg.

Precalentamiento del C = $426947x(0,206 + 0,000112\ t) \cdot t = 87951\ t + 47,82\ t^2$

Potencia calorífica del C $\rightarrow$ CO = 426947 x 2430 = 1037'481.210 Kcal.

Calor de descomposición del H_2O = 135'855.255 Kcal.

Calor disponible = 381'794.112 + 21'488.544 + 1037'481.210 + 87951 t + 47,82 t^2 – 135'855.255 = 1304'908.641 + 87951 t + 47,82 t^2.

Contenido de calor en los productos de combustión:

$N_2 + CO = (1'375.536 + 796.968) \times (0,302 + 2,2x10^{-5}\ t) \cdot t =$
$H_2 \quad = 75240x(0,301 + 2x10^{-5}\ t) \cdot t \qquad =$

$\Sigma = 678743\ t + 49,30\ t^2$

Igualando el calor disponible con el calor en los productos de combustión y despejando:

$1,48\ t^2 + 590792\ t - 1304'908.641 = 0\ \therefore$
t = 2197ºC.

Sin vapor de agua:

Calor disponible = precalentamiento del aire (seco) + precalentamiento del C + potencia calorífica del C:

Precalentamiento del C = 386640 x (0,206 + 0,000112 t) · t = 79648 t + 43,30 t^2

Potencia calorífica del C = 386640x2430 = 939'535.200 Kcal.

Calor disponible = 381'794.112 + 939'535.200 + 79648 t + 40,30 t^2
= 1321'329.312 + 79648 t + 40,30 t^2

Calor en productos de combustión:
N_2 + CO = (1'375.536 + 721728) x (0,302 + 2,2x10^{-5} t) · t = 633374 t + 46,14 t^2

Igualando: (calor disponible = calor en productos de combustión) y despejando:

2,84 t^2 + 552726 t – 1321'329.312 = 0 ∴
t = 2358°C

Disminución de temperatura = 2358 – 2197 = 161°C
En vapor de agua disminuyó la temperatura en 161°C (30-10)

EJERCICIO N°31 (7)

Un alto horno funciona bajo 2 condiciones atmosféricas:

a. Soplo seco, presión barométrica de 760 mm, temperatura de 600°C.
b. Soplo húmedo, presión barométrica de 700 mm, temperatura de 600°C; saturado con humedad a 25°C, entes de calentarlo.

Las máquinas operan a velocidad constante o desplazamiento constante del pistón.

La temperatura crítica necesitada en la zona de fusión se asume como de 1500°C. Asumir que el carbono quemado en la zona de fusión está precalentado a esta temperatura.

PREGUNTAS

1. La temperatura teórica máxima de los gases en la zona de fusión, en el caso (a.).
2. Lo mismo, para el caso (b.).
3. El peso relativo del carbono quemado por día en la zona de toberas por el soplo, en los dos casos.
4. Si, en el caso (a.) se necesitan 800 kilogramos de carbono ante las toberas por tonelada de arrabio, ¿cuántos serían requeridos en el caso (b.)?.

SOLUCION

1.

Reacción:

C + ½ O_2 = CO

Asumimos 1 Kg. de C:

O_2 = 1 x 0,5 x 22,4 / 12 = 0,9333 m^3; CO = 2 O_2 = 1,8666 m^3
Aire = 0,9333/0,21 = 4,4443 m^3; N_2 = 0,9333 x 79 / 21 = 3,5110 m^2

Calor disponible = Precalentamiento del aire + Precalentamiento del C + Potencia calorífica = Calor en productos de combustión.

Precalentamiento del aire a 600°C = $4{,}4443 x(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x600) x 600$ = 840,51

Precalentamiento del C = $1x (0{,}206 + 1{,}78x10^{-4}x1500 - 3{,}3x18^{-8}x1500^2)x1500$ = 598,13 .

Potencia calorífica del C = 1 x 2430 = <u>2430,00 Kcal.</u>
Calor disponible = 3868,64 Kcal.

Calor en los productos de combustión:
$CO + N_2 = (3{,}511 + 1{,}8666) x (0{,}302 + 2{,}2x10^{-5} t) x t = 1{,}624 t + 1{,}183x10^{-4} t^2$

$3868{,}64 = 1{,}624 t + 1{,}183x10^{-4} t^2 \therefore$

t = 2070°C

Temperatura máxima de los gases en la zona de fusión = 2070°C (31-1)

2.
Presión de saturación del agua a 25°C = 23,8 mm
Presión de aire seco = 700 – 23,8 = 676,2 mm

Volumen de agua = 4,4443 x 23,8 / 676,2 = 0,1564 m^3

En las toberas:
$H_2O + C = CO + H_2$

$CO = H_2 = 0{,}1564\ m^3$
CO total = 0,1564 + 1,8666 = 2,023 m^3

C = 0,1564x12/22,4 = 0,0838 Kg.
C total = 0,0838 + 1 = 1,0838 Kg.

Calor disponible = precalentamiento de aire seco + precalentamiento de humedad + precalentamiento del C + potencia calorífica – calor de descomposición del agua. = calor en productos de combustión.

Precalentamiento del aire seco = 840,51 Kcal.
Precalentamiento del agua = $0{,}1564x(0{,}373 + 5x10^{-5}x600)x600$ = 37,82 Kcal.
Precalentamiento del C = $1{,}0838x(0{,}206 + 1{,}78x10^{-4}x1500 - 3{,}3x10^{-8}x1500^2)x1500$ = 648,25
Potencia calorífica del C = 1.0838x2430 = 2633,63
Calor de descomposición del agua = 0,1564x3210 x18/22,4 = 403,43

Calor disponible = 840,51 + 37,83 + 648,25 + 2633,63 – 403,43 = 3756,78 Kcal.

Calor en productos de combustión:
$CO + N_2 = (1{,}8666 + 3{,}511)x(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}t)\cdot t$ =
$H_2 = 0{,}1564x(0{,}301 + 2x10^{-5}t) \cdot t$ = ______________.
Calor en productos de combustión = $1{,}6711 t + 1{,}214x10^{-4} t^2$

$3756{,}78 = 1{,}6711 t + 1{,}214x10^{-4} t^2 \therefore$

t = 1967°C

Temperatura teórica de gases en zona de fusión = 1967°C (31-2)

3.
Caso (a):

A la temperatura crítica de 1500°C:

Contenido de calor en los productos de combustión, por kilogramo de C:
$CO + N_2 = 5{,}3776x(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x1500) x 1500$ = 2702,24 Kcal.
Potencia calorífica del C = 1 x 2430 = 2430 Kcal.

Incremento de calor en la chimenea = 2702,24 – 2430 = 272,24 Kcal.

Elevación del calor suministrado por los calores sensibles = 840,51 + 2430 + 598,13 =
= 3864,64 Kcal.

Nuevo incremento = 3864,64 – 2430 = 1434,64 Kcal.
Caída relativa en el consumo de C = 1 x (272,24/1434,64) = 0,1897 = 19,0%

Caso (b):

Contenido de calor en los productos de combustión, por kilogramo de C a 1500°C =

$$= \frac{1{,}6711 \times 1500 + 1{,}214\times10^{-4} \times 1500^2}{1{,}0838} = 2565 \text{ Kcal.}$$

Incremento de calor en la chimenea = 2565 – 2430 = 135 Kcal.

Elevación del calor suministrado por Kg. de C = 3756,78/1,0838 = 3466,3 Kcal.

Nuevo incremento = 3466,3 – 2430 = 1036,30 Kcal.
Caída relativa del consumo de C = 1x(135/1036,3) = 0,130 = 13%

Caídas relativas = 19 – 13 = 6% mayor en (a)
Caídas relativas del consumo de C = 6% mayor en (a) (31-3)

4.
Jhonson afirma (7) que el consumo de coque (C) es en modo general inversamente proporcional, no al contenido total de calor en los gases en la zona de fusión, sino al exceso de calor representado por los incrementos frente a la potencia calorífica. De este modo:

C requerido en (b) = 800·(1434,64/1036,6) = 1107,2 Kg.
C requerido en (b) = 1107,2 Kg. (31-4)

EJERCICIO N°32 (7)

La escoria y el arrabio de un alto horno elevaron su temperatura en la zona de fusión a 1500°C. El soplo entra al horno a 700°C. El aire en el exterior se encuentra a 28°C y está ½ saturado con humedad. Presión barométrica = 735 mm.

Asumir que el carbono, justo antes de la combustión, se encuentra a 1500°C.

PREGUNTAS

1. La temperatura teórica máxima de los gases calientes en las toberas.
2. La temperatura máxima, si el soplo es enriquecido a 28% de oxígeno.
3. Compare en los dos casos, el poder relativo de fusión del horno.

SOLUCION

1.
Cálculo de la humedad del aire:

A 28°C, la máxima presión de saturación de valor de agua (Tabla XXIV del Apéndice) = 28,3 mm.

Presión real del vapor de agua = 28,3x0,5 = 14,13 mm

Asumimos 100 m^3 de aire húmedo:

H_2O = 14,15/735 = 0,0196 = 1,96%
Aire seco = 100 – 1,96 = 98,04%

Volumen de H_2O = 100x0,0196 = 1,96 m^3
Volumen de aire seco = 100 x 0,9804 = 98,04 m^3

Reacciones:
(1) $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$
(2) $H_2O + C = CO + H_2$

En (1):
O_2 = 98,04x0,21 = 20,59 m^3; CO = 41,18 m^3; N_2 = 90,04 – 20,59 = 77,45 m^3; C = 20,59x12/11,2 = 22,06 Kg.

En (2):
H_2 = CO = 1,96 m^3; C = 1,96x12/22,4 = 1,05 Kg., H_2O = 1,96x18/22,4 = 1,575 Kg.

C total = 22,06 + 1,05 = 23,11 Kg.
CO total = 41,18 + 1,96 = 43,14 m^3

Calor disponible = calor por precalentamientos + potencia calorífica del C – calor de descomposición del H_2O = contenido de calor en gases.

Calor de descomposición del H_2O = 1,575x3210 = 5056 Kcal.

Precalentamientos:

$C = 23{,}11x(0{,}2 + 1{,}8x10^{-4}x1500 - 3{,}3x10^{-8}x1500^2)x1500$	= 13719 Kcal.
$\text{Aire seco} = 98{,}04x(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}x700)x700$	= 21783 Kcal.
$H_2O = 1{,}96x(0{,}373 + 5x10^{-5}x700)x700$	= 560 Kcal.
Calor total por precalentamientos	= 36062 Kcal.

Potencia calorífica del C→ CO = 2430x23,11 = 56157 Kcal.

Calor disponible = 56157 + 36062 – 5956 = 87163 Kcal.

Contenido de calor sensible en los productos de combustión:

$CO + N_2 = 120{,}59x(0{,}302 + 2{,}2x10^{-5}\ t) \cdot t =$
$H_2 = 1{,}96x(0{,}301 + 2x10^{-5}\ t) \cdot t =$
$\Sigma = 37{,}01\ t + 2{,}692x10^{-3}\ t^2$

$87163 = 37{,}01\ t + 1{,}692x10^{-3}\ t^2 \therefore$

t = 2050ºC

Temperatura teórica de los gases = 2050ºC (32-1)

2.
$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$

O_2 = 98,04x0,28 = 27,45 m^3; CO = 54,9 m^3; C = 27,45x12/11,2 = 29,41 Kg.; N_2 = 98,04 – 27,45 = 70,59 m^3

C total = 29,41 + 1,05 = 30,46 Kg.
CO total = 54,9 + 1,96 = 56,86 m^3

Los precalentamientos del aire seco y del agua son los mismos del caso anterior.
Precalentamiento del C = 13719x(30,46/23,11) = 18082 Kcal.

Potencia calorífica del C = 30,46x2430 = 74018 Kcal.

Calor disponible = 74018 + 18082 + 21783 + 560 – 5056 = 109387 Kcal.

Contenido de calor en los productos de combustión:

$CO + N_2 = 127{,}45x(0.302 + 2{,}2x10^{-5}\, t) \cdot t =$
$H_2 = 1{,}96x(0{,}301 + 2x10^{-5}\, t) \cdot t =$
$\Sigma = 39{,}08\, t + 2{,}843x10^{-3}\, t^2$

$109387 = 39{,}08\, t + 2{,}843x10^{-3}\, t^2 \therefore$

t = 2385°C

Temperatura máxima con aire enriquecido = 2385°C (32-2)

3.
Disponibilidad de calor:

Sin aire enriquecido = 87163 Kcal.
Con aire enriquecido = 109387 Kcal.
Diferencia = 109387 – 87163 = 22224 Kcal.

Poder relativo de fusión = 22224/87163 = 0,255 = 25,5%

Este mismo resultado se obtiene si asumimos que el poder relativo de fusión (representado el el calor disponible), sin aire enriquecido es = 100% y calculamos a cuanto equivale el del aire enriquecido:

Poder relativo con aire enriquecido = 109387/87163 = 1,2549 = 125,5%

Poder relativo con aire enriquecido = 125,5 – 100 = 25,5% mayor

Poder relativo de fusión = 25,5% mayor con aire enriquecido (32.3)

EJERCICIO N°33 (7)

El siguiente mineral fue utilizado en un alto horno:

Fe_2O_3	78,0%	MnO	2,6%
SiO_2	8,2	P_2O_5	1,9
Al_2O_3	4,0	H_2O	5,3

El coque tenía: 88%C; 10%SiO_2; 2%H_2O. El fundente, $CaCO_3$ puro.

El coque totalizó tres quintos del peso del mineral, y el fundente un cuarto del peso del mineral.

El horno redujo todo el fósforo, la mitad del manganeso y la quinta parte del silicio cargados. Asumir que no hay pérdida de hierro en la escoria y que absorbió el 4% de su peso en carbono.

El soplo fue de 1500 metros cúbicos, por tonelada de mineral (asumido seco).

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas del horno, basado en 1000 kilogramos de mineral.
2. La composición (%) del arrabio, la escoria y el gas.

SOLUCION

1.

A continuación se muestra el cuadro con el balance de cargas. Los respectivos cálculos se realizan más abajo.

BALANCE DE CARGAS (33-1)

CARGA (Kg.)		PRODUCTOS (Kg.)					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Mineral	1000						
Fe_2O_3	780	Fe	546,00	---	---	O	234,00
SiO_2	82	Si	13,25	SiO_2	53,6	O	15,15
Al_2O_3	40	---	---	Al_2O_3	40,0	---	---
MnO	26	Mn	10,08	MnO	13,0	O	2,92
P_2O_5	19	P	8,30	---	---	O	10,70
H_2O	53	---	---	---	---	H_2O	53,00
Coque	600						
C	528	C	21,84	---	---	C	506,16
SiO_2	60	---	---	SiO_2	60,0	---	---
H_2O	12	---	---	---	---	H_2O	12,00
Fundente	250						
$CaCO_3$	250	---	---	CaO	140,0	CO_2	110,00
Soplo	1931,25						
N	1481,25	---	---	---	---	N	1481,25
O	450	---	---	---	---	O	450,0
Totales	3781,25		599,47		306,6		2875,18

Coque = 1000x3/5 = 600 Kg.
C = 600 x 0,88 = 528 Kg.
SiO_2 = 600 x 0,10 = 60 Kg.
H_2O = 600 x 0,02 = 12 Kg.

$CaCO_3$ = 1000 x ¼ = 250 Kg.

Mineral = 1000 Kg.
Fe_2O_3 = 1000 x 0,78 = 780 Kg.
SiO_2 = 1000 x 0,082 = 82 Kg.
Al_2O_3 = 1000 x 0,04 = 40 Kg.
MnO = 1000 x 0,026 = 26 Kg.
P_2O_5 = 1000 x 0,019 = 19 Kg.
H_2O = 1000 x 0,053 = 53 Kg.

Distribución de la carga:

Arrabio:

Arrabio = Fe + C + Si + Mn + P
Fe en arrabio = 780 x 112/160 = 546 Kg.

P en arrabio = 19 x 62/142 = 8,30 Kg.

SiO_2 total = 60 + 82 = 142 Kg.
SiO_2 reducido = 142 x 1/5 = 28,4 Kg. (este lo sacamos del mineral).
Si a arrabio = 28,4 x 28/60 = 13,25 Kg.

MnO reducido = 26 x ½ = 13 Kg.
Mn a arrabio = 13 x55/71 = 10,08 Kg.

C a arrabio = 546 x 0,04 = 21,84 Kg.

Peso del arrabio = 546 + 13,25 + 10,08 + 8,30 + 21,84 = 599,47 Kg.

Escoria = SiO_2 + Al_2O_3 + MnO + CaO

SiO_2 a escoria = 142 – 28,4 = 113,6 Kg.

MnO a escoria = 26 – 13 = 13 Kg.

CaO a escoria = 250 x 0,56 = 140 Kg.

Peso de la escoria = 113,6 + 13 + 140 + 40 = 306,60

Gas = H_2O + CO + CO_2 + N_2

O del soplo = 1500 x 0,21 x 32/22,4 = 450 Kg.
O aportado por Fe_2O_3 = 780 – 546 = 234 Kg.
O aportado por SiO_2 = 28,4 – 13,25 = 15,15 Kg.
O aportado por P_2O_5 = 19 – 8,30 = 10,70 Kg.
O aportado por MnO = 13 – 10,08 = 2,92 Kg.

O total en gas sin el del H_2O y el del $CaCO_3$ = 450 + 234 + 15,15 + 10,70 + 2,92 = 712,77 Kg.

C quemado en toberas = 528 – 21,84 = 506,16 Kg.

$O \rightarrow CO$ = 506,16 x 16/12 = 675 Kg.
CO = 675 x 28/16 = 1180 Kg.

$O \rightarrow CO \rightarrow CO_2$ = 712,77 – 675 = 37,77 Kg.
$CO \rightarrow CO_2$ = 37,77 x 28/16 = 63,8 Kg.
CO_2 formado = 63,8 x 44/28 = 100,3 Kg.

CO en gas = 1180 – 63,8 = 1116,2 Kg.

CO_2 del $CaCO_3$ = 250 – 140 = 110 Kg.
CO_2 total en gas = 100 + 110 = 210 Kg.

H_2O en gas = 53 + 12 = 65 Kg.

N_2 en gas = 1500x0,79x28/22,4 = 1481,25 Kg.

Con los cálculos realizados se conforma el balance de cargas. (33-1)

2.

Composición del arrabio del arrabio: (33-2)

Fe	=	546,00 Kg.	= 91,08%
Si	=	13,25 Kg.	= 2,21%
Mn	=	10,08 Kg	= 1,68%
P	=	8,30 Kg.	= 1,38%
C	=	21,84 Kg.	= 3,65 %
		599,47 Kg.	= 100,00%

Composición de la escoria (33-2)

SiO_2 = 113,6 Kg. = 37,05%
Al_2O_3 = 40,0 Kg. = 13,05%
MnO = 13,0 Kg. = 4,24%
CaO = 140,0 Kg. = 46,66%
306,6 Kg. = 100,00%

Composición del gas: (33-2)

N_2 = 1481,25x22,4/28 = 1185 m^3 = 53,30%
CO = 1116,2x22,4/28 = 893 m^3 = 39,41%
CO_2 = 210x22.4/44 = 107 m^3 = 4,72%
H_2O = 65x22,4/18 = 81 m^3 = 3,57%
2266 m^3 =100,00%

EJERCICIO Nº34 (7)

Un alto horno funde 900 toneladas cortas de mineral de hierro por día, utilizando 1/6 Kg. de $CaCO_3$ por kilogramo de mineral y 0,6 Kg. de coque por kilogramo de mineral; el coque contiene 85%C y 15%SiO_2.

El mineral analizó lo siguiente:

Fe_2O_3	80%	P_2O_5	1%
SiO_2	9	Al_2O_3	6
MnO	2	H_2O	2

El horno reduce a metal todo el Fe_2O_3 y el P_2O_5 cargados, también tres cuartos del MnO y un quinto del SiO_2. El arrabio contiene 4% de carbono.

Los gases del horno contienen 26%CO y 11%CO_2.

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas completo del horno, basado en libras por día.
2. La composición de la escoria y los gases.

SOLUCION

1.

En la página siguiente se presenta el balance de cargas, como resultado de los cálculos que aparecen más abajo:

1 tonelada corta = 2000 libras.

Carga (libras):

Mineral = 900 x 2000 = 1'800.000
Fe_2O_3 = 1'800.000 x 0,8 = 1'440.000
SiO_2 = " x 0,09 = 162000
MnO = " x 0,02 = 36000
P_2O_5 = " x 0,01 = 18000
Al_2O_3 = " x 0,06 = 108000
H_2O = " x 0,02 = 36000

Coque = 0,6x900x2000 = 1'080.000
C = 1'080.000 x 0,85 = 918000
SiO_2 = " x 0,15 = 162000

Fundente = $CaCO_3$ = 900 x 2000 x 1/6 = 300000

BALANCE DE CARGAS (34-1)
(libras por día)

CARGA		PRODUCTOS					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Mineral	1'800.000						
Fe_2O_3	1'440.000	Fe	1'008.000	---	---	O	432.000
SiO_2	162.000	Si	30.240	SiO_2	97.200	O	34.560
MnO	36.000	Mn	21.000	MnO	9.000	O	6.000
P_2O_5	18.000	P	7.860	---	---	O	10.140
Al_2O_3	108.000	---	---	Al_2O_3	108.000	---	---
H_2O	36.000	---	---	---	---	H_2O	36.000
Fundente							
$CaCO_3$	300.000	---	---	CaO	168.000	CO_2	132.000
Coque	1'080.000						
C	918.000	C	44.458	---	---	C	873.542
SiO_2	162.000	---	---	SiO_2	162.000	---	---
Soplo	4'638.371						
N	3'557.586	---	---	---	---	N	3'557.586
O	1'080.785	---	---	---	---	O	1'080.785
Total	7'818.371		1'111.558		544.200		6'162.613

Distribución de la carga (libras por día):

Arrabio:
Arrabio = Fe + P + Mn + Si + C

Fe a arrabio = 1'440.000 x 112/160 = 1'008.000
O en Fe_2O_3 = 1'440.000 – 1'008.000 = 432000

P a arrabio = 18000 x 62/142 = 7860
O del P_2O_5 = 18000 – 7860 = 10140

MnO reducido = 36000 x3/4 = 27000
Mn a arrabio = 27000 x 55/71 = 21000
O de este = 27000 – 21000 = 6000

SiO_2 total = 162000x2 = 324000
SiO_2 reducido = 324000 x 1/5 = 64800
Si a arrabio = 64800 x 28/60 = 30240
O de este = 64800 – 30240 = 34560

96% arrabio = 1'008.000 + 7860 + 21000 + 30240 = 1'067.100
C a arrabio =1'067.000 x 4/96 = 44458
C del coque a gas = 918000 – 44458 = 873542

Escoria:
Escoria = SiO_2 + Al_2O_3 + CaO + MnO

CaO del $CaCO_3$ = 300000 x 56/100 = 168000
CO_2 de este = 300000 – 168000 = 132000

SiO_2 a escoria = 324000 – 64800 = 259200

MnO a escoria = 36000 – 27000 = 9000
Escoria total = 108000 + 168000 + 259200 + 9000 = 544200

Gas:
Gas = $CO + CO_2 + H_2O + N_2$

Para calcular el volumen del gas, utilizamos la expresión (1):

C del $CaCO_3$ = 300000 x 0,12 = 36000
C total en gases = 873542 + 36000 = 909542
C en gas = (0,26 + 0,11) x 12/359 = 0,01237 lb/ft^3

Gas total = 909542/0,01237 = 73'541.796,85 ft^3

CO = 73'541.797x0,26 = 19'120.867 ft^3
CO_2 = " x0,11 = 8'089.598 ft^3
H_2O = 36000 x 359/18 = 718000 ft^3
N_2 = 73'541.797 – 19'120.867 – 8'089.598 – 718000 = 45'613.332 ft^3 = 3'557.586 lbs

O del soplo = 45'613.332 x 21/79 x 32/359 = 1'080.785 lbs.

Con los datos calculados anteriormente, se elabora el balance de cargas.

2.

Composición de la escoria: (34-2)
SiO_2 = 259200 lbs. = 47,7%
Al_2O_3 = 108000 lbs. = 19,8%
CaO = 168000 lbs = 30,8%
MnO = 9000 lbs. = 1,7%
544200 lbs. =100,0%

Composición del gas: (34-2)
N_2 = 45'613.332 ft^3 = 62,02%
CO = 19'120.867 ft^3 = 26,00%
CO_2 = 8'089.598 ft^3 = 11,00%
H_2O = 718.000 ft^3 = 0,98%
73'541.797 ft^3 = 100,00%

EJERCICIO N°35 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composición:

Fe	92,8%	C	3,8%	Mn	0,3%
Si	2,1	P	0,9	S	0,1

El mineral utilizado fue analizado como sigue:

Fe_2O_3	78,0%	Al_2O_3	3,0%	P_2O_5	1,9%
SiO_2	8,2	MnO	2,6	MgO	1,2
H_2O	5,1				

El fundente totalizó un cuarto del peso del mineral y su composición fue:

$CaCO_3$ 96% SiO_2 2% $MgCO_3$ 2%

Se utilizaron 1000 kilogramos de coque por tonelada de arrabio, y su composición fue:

C 88% FeS 2% SiO_2 8% H_2O 2%

Los gases contenían 2 1/3 partes de CO a 1 parte de CO_2.

Asumir que todo el hierro del mineral se reduce, el hierro del coque todo es escorificado. El S que no entra al arrabio, pasa a la escoria como CaS. El P que no va al arrabio, pasa a la escoria como P_2O_5.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral utilizado, por tonelada de arrabio.
2. Un balance de cargas completo del horno, por tonelada de arrabio.
3. La composición (%) de la escoria y los gases.

SOLUCION

1.

Peso de Fe en arrabio = Peso de Fe en mineral.

Fe en arrabio = 1000x0,928 = 928 Kg.
Fe en mineral = 78x112/160 = 54,5%

Mineral = 928/0,545 = 1700 Kg.

Peso del mineral = 1700 Kg. (35-1)

2.

El cuadro con el balance de cargas se muestra a continuación y los respectivos cálculos aparecen más adelante:

BALANCE DE CARGAS (35-1)
(en kilogramos)

CARGA		PRODUCTOS					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Mineral	1700						
Fe_2O_3	1326,4	Fe	928,0	---	---	O	398,00
SiO_2	139,4	Si	21,0	SiO_2	94,4	O	24,00
Al_2O_3	51,0	---	---	Al_2O_3	51,0	---	---
MnO	44,2	Mn	3,0	MnO	40,3	O	0,90
P_2O_5	32,3	P	9,0	P_2O_5	11,3	O	12,00
MgO	20,4	---	---	MgO	20,4	---	---
H_2O	86,7	---	---	---	---	H_2O	86,7
Fundente	425						
$CaCO_3$	408	---	---	Ca	7,9	O	3,16
				CaO	217,42	CO_2	179,52
$MgCO_3$	8,5	---	---	MgO	4,05	CO_2	4,45
SiO_2	8,5	---	---	SiO_2	8,50	---	---
Coque	1000,0						
C	880,0	C	38,0	---	---	C	842,00
SiO_2	80,0	---	---	SiO_2	80,00	---	---
FeS	20,0	S	1,0	Fe	12,7	---	---
				S	6,30	---	---
H_2O	20,0	---	---	---	---	H_2O	20,00
Soplo	4245						
N	3269	---	---	---	---	N	3269,00
O	976	---	---	---	---	O	976,00
Total	7370		1000,0		554,97		5815,73

Carga en kilogramos:

Mineral:

Fe_2O_3 = 1700x0,78 = 1326
SiO_2 = 1700x0,082 = 139,4
Al_2O_3 = 1700x0,03 = 51,0
MnO = 1700x0,026 = 44,2
P_2O_5 = 1700x0,019 = 32,3
MgO = 1700x0,012 = 20,4
H_2O = 1700x0,051 = 86,7

Fundente = 1700 x ¼ = 425

$CaCO_3$ = 425x0,96 = 408
$MgCO_3$ = 425 x 0,02 = 8,5
SiO_2 = 425x0,02 = 8,5

Coque = 1000

C = 1000x0,88 = 880
SiO_2 = 1000x0,08 = 80
FeS = 1000x0,02 = 20
H_2O = 1000x0,02 = 20

Distribución de la carga (Kilogramos):

Escoria y gases:

Escoria = SiO_2 + CaO + Al_2O_3 + MgO + MnO + P_2O_5 + CaS + FeO

Gases = N_2 + CO + CO_2 + H_2O

Fe arrabio = Fe en Fe_2O_3 = 1326 x 112/160 = 928
O de este = 1326 – 928 = 398

Si en arrabio = 1000x0,021 = 21
SiO_2 reducido = 21 x 60/28 = 45
O de este = 45 – 21 = 24
SiO_2 a escoria = 139,4 + 8,5 – 45 = 102,9 (el SiO_2 de la escoria lo vamos a deducir del mineral).
Mn arrabio = 1000x0,003 = 3
MnO reducido = 3 x 71/55 = 3,9
O de este = 3,9 – 3 = 0,9
MnO a escoria = 44,2 – 3,9 = 40,3

P en arrabio = 1000x0,009 = 9
P_2O_5 reducido = 9 x142/62 = 21
O de este = 21 – 9 = 12
P_2O_5 a escoria = 32,3 – 21 = 11,3

MgO del ($MgCO_3$) = 8,5x40/84 = 4,05
CO_2 de este = 8,5 – 4,05 = 4,45
MgO a escoria = 20,4 + 4,05 = 24,45

Fe en FeS = 20 x 56/88 = 12,7 (a escoria como FeO)
FeO de este = 12,7 x 72/56 = 16,4
O de este = 16,4 – 12,7 = 3,7
S total = 20 – 12,7 = 7,3
S en arrabio = 1000x0,001 = 1
S → CaS = 7,3 – 1 = 6,3
CaS = 6,3 x 72/32 = 14,2

$Ca \rightarrow CaS$ = 14,2 – 6,3 = 7,9
CaO del $Ca \rightarrow CaS$ = 7,9 x 56/40 = 11,06
O del $CaO \rightarrow CaS$ = 11,06 – 7,9 = 3,16
CaO en $CaCO_3$ = 408 x 56/100 = 228,48
CaO a escoria = 228,48 – 11,06 = 217,42
CO_2 del $CaCO_3$ = 408 – 217,42 – 3,16 – 7,9 = 179,52

$CO:CO_2$ = 2,33:1

CO_2 en fundente = 179,52 + 4,45 = 183,97 ≅ 194
C en CO_2 194x12/44 = 53
O de este = 194 – 53 = 141
C total en gas = 842 + 53 = 895

C en CO = 895x 2,33/3,33 = 626,2
C en CO_2 = 895 – 626,2 = 268,8

CO en gas = 626,2 x 28/12 = 1461,1
CO_2 en gas = 268,8 x 44/12 = 985,6

O del CO = 1461,1 – 626,2 = 834,9
O del CO_2 = 985,6 – 268,8 = 716,8
O en CO y CO_2 = 1551,7
O de reducción = 398 + 24 + 0,9 + 12 + 3,16 + (141 – 3,7) = 575,36 Kg.
O del soplo = 1551,7 – 575,36 = 976,34

Soplo = 976,34/0,23 = 4245 Kg.

N = 4245 – 976,34 = 3268,62

Con estos datos se realiza la tabla con el Balance de las cargas.

3.

Composición de la escoria; (35-3)

SiO_2 = 182,90 Kg. = 32,8%
CaO = 217,42 Kg. = 39,0%
Al_2O_3 = 51,00 Kg. = 9,1%
MgO = 24,45 Kg. = 4,4%
MnO = 40,30 Kg. = 7,2%
P_2O_5 = 11,30 Kg. = 2,1%
CaS = 14,20 Kg. = 2,5%
FeO = 16.40 Kg. = 2,9%
557,97 Kg.

Composición del gas (35-3)

N_2 = 2615 m^3 = 59,2%
CO = 1169 m^3 = 26,4%
CO_2 = 502 m^3 = 11,4%
H_2O = 133 m^3 = 3,0%
4419 m^3

EJERCICIO N°36 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composición:

Fe	93,4%	C	3,8%
Si	2,3	Mn	0,5

El mineral tratado presentó el siguiente análisis:

Fe_2O_3	80,0%	Al_2O_3	3,5%
SiO_2	8,3	MnO_2	3,1
H_2O	5,1		

El peso del fundente fue un cuarto del peso del mineral y contenía 96%$CaCO_3$ y 4%SiO_2. La cantidad de coque fue 1900 libras por tonelada de arrabio conteniendo 88%C; 8%SiO_2 y 4%H_2O.

Se utilizaron 95000 pies cúbicos de aire por tonelada de arrabio. Asumir que todo el hierro es reducido.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral, por tonelada de arrabio.
2. Un balance de cargas completo del horno.
3. El volumen del gas del alto horno.

SOLUCION

1.

Fe en arrabio = Fe en mineral.

Fe en arrabio = 2000x0,934 = 1868 libras.
Fe en mineral = 80x112/160 = 56%

Mineral = 1868/0,56 = 3336 lbs.

Peso del mineral = 3336 libras por tonelada de arrabio (36-1)

2.

El balance de cargas se muestra en la siguiente página y es el resultado de los cálculos que aparecen a continuación:

Carga en libras:

Mineral:

Fe_2O_3 = 3336 x 0,8 = 2668,8
SiO_2 = " x 0,083 = 276,89
Al_2O_3 = " x 0,035 = 116,76
MnO_2 = " x 0,031 = 103,42
H_2O = " x 0,051 = 170,14

Fundente = 3336/4 = 834

$CaCO_3$ = 834 x 0,96 = 800,64
SiO_2 = " x 0,04 = 33,36

Coque = 1900:

C = 1672; SiO_2 = 152; H_2O = 76

BALANCE DE CARGAS (36-2)

CARGA (libras)		PRODUCTOS (libras)					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Mineral	3336						
Fe_2O_3	2668,80	Fe	1868	---	---	O	800,80
SiO_2	276,89	Si	46	SiO_2	178,39	O	52,5
Al_2O_3	116,76	---	---	Al_2O_3	116,76	---	---
MnO_2	103,42	Mn	10	MnO	71,70	O	21,72
H_2O	170,14	---	---	---	---	H_2O	170,14
Fundente	834						
$CaCO_3$	800,64	---	---	CaO	448,36	CO_2	352,28
SiO_2	33,36	---	---	SiO_2	33,36	---	---
Coque	1900						
C	1672	C	76	---	---	C	1596,00
H_2O	76	---	---	---	---	H_2O	76,00
SiO_2	152	---	---	SiO_2	152	---	---
Soplo	7631,8						
N	5853,5	---	---	---	---	N	5853,5
O	1778,3	---	---	---	---	O	1778,3
Total	13701,8		2000		1000,57		10701,24

Distribución de la carga (libras):

Si en arrabio = 2000 x 0,023 = 46
SiO_2 reducido = 46x60/28 = 98,5 (este sale del mineral).
O de este = 98,5 – 46 = 52,5
SiO_2 del mineral → escoria = 276,89 – 98,5 = 178,39
Total SiO_2 → escoria = 178,39 + 33,36 + 152 = 363,75

Mn en arrabio = 2000 x 0,005 = 10
MnO_2 reducido = 10 x 87/55 = 15,5
O de este = 15,5 – 10 = 5,5
MnO_2 → MnO = 103,42 – 15,5 = 87,92
MnO → escoria = 87,92 x 71/87 = 71,7
O de este = 87,92 – 71,7 = 16,22
O aportado por MnO_2 = 5,5 + 16,22 = 21,72

C en arrabio = 2000 x 0,038 = 76
C del coque → gas = 1672 – 76 = 1596

CaO → escoria = 800,64 x 0,56 = 448,36
CO_2 del $CaCO_3$ = 800,64 – 448,36 = 352,28

O del soplo = 19950 x 32/359 = 1778,3
O aportado por aire y reducciones = 1778,3 + 800,8 + 52,5 + 21,72 = 2655,02
Con estos datos más en N que se calcula más adelante, se estructura el balance de cargas

3.

O → CO en toberas = 1596 x 16/12 = 2128
CO formado = 2128 x 28/16 = 3724
O → CO → CO_2 = 2655,02 – 2128 = 527,02
CO → CO_2 = 517,02 x 28/16 = 921
CO_2 formado = 921 x 44/28 = 1450

CO en gas = 3724 – 921 = 2803

CO_2 total en gas = 1450 + 352,28 = 1802,28

H_2O total en gas = 170,14 + 76 = 246,14

N en gas = 95000 x0,79 = 75050 ft^3 = 5853,5 lbs

Gas = $N_2 + CO + CO_2 + H_2O$

Volumen del gas = 75050 + 2803x359/28 + 1802,28x359/44 + 246,14x359/18
= 130650 ft^3

Volumen del gas = 130650 ft^3/ ton. de arrabio (36-3)

EJERCICIO N°37 (7)

Un mineral fundido en un alto horno contenía lo siguiente:

Fe_2O_3	76%	MnO_2	3%	SiO_2	11%
Al_2O_3	3	P_2O_5	1	H_2O	4
CaO	2				

El coque utilizado tenía la siguiente composición:

C	86%	SiO_2	9%
Al_2O_3	1	FeS	2
H_2O	2		

La piedra caliza analizó:

CaO	50%	MgO	5%
Al_2O_3	1	SiO_2	1
CO_2	43		

El análisis del arrabio fue el siguiente:

C	3,80%	Mn	1,05%
Si	0,90	P	0,75
Fe	93,40	S	0,10

Se cargó una tonelada de coque por tonelada de arrabio producido. Asumir que el 2% del Fe cargado se pierde en la escoria como FeO. La escoria contiene partes iguales de CaO y SiO_2.
82% del carbono del coque es quemado en las toberas.
El azufre que no pasa al arrabio, entra a la escoria como CaS.
El manganeso que no aparece en el arrabio, está en la escoria como MnO.

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas completo del horno (basado en 1000 Kg. de arrabio).
2. la composición, en porcentajes, de la escoria y los gases.

SOLUCION

1.

A continuación aparece el cuadro con el balance de cargas del horno, para 1000 Kg. de arrabio, fundamentado en los cálculos que se realizan más adelante:

BALANCE DE CARGAS (37-1)
(Kg.)

GARGA		PRODUCTOS					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Mineral	1768,0						
Fe_2O_3	1343,7	Fe	921,3	FeO	24,6	O	397,8
MnO_2	53,0	Mn	10,5	MnO	29,7	O	12,8
SiO_2	194,5	Si	9,0	SiO_2	175,2	O	10,3
Al_2O_3	53,0	---	---	Al_2O_3	53,0	---	---
P_2O_5	17,7	P	7,5	P_2O_5	0,5	O	9,7
H_2O	70,7	---	---	---	---	H_2O	70,7
CaO	35,4	---	---	CaO	24,3	---	---
				Ca	7,9	O	3,2
P. Caliza	491,6						
CaO	245,8	---	---	CaO	245,8	---	---
MgO	24,6	---	---	MgO	24,6	---	---
Al_2O_3	4,9	---	---	Al_2O_3	4,9	---	---
SiO_2	4,9	---	---	SiO_2	4,9	---	---
CO_2	211,4	---	---	---	---	CO_2	211,4
Coque	1000,0						
C	860,0	C	38,0	---	---	C	822,0
SiO_2	90,0	---	---	SiO_2	90.0	---	---
Al_2O_3	10,0	---	---	Al_2O_3	10,0	---	---
FeS	20,0	Fe	12,7	---	---	---	---
		S	1,0	S	6,3	---	---
H_2O	20,0	---	---	---	---	H_2O	20,0
Soplo	4053						
O	940,3	---	---	---	---	O	940,3
N	3112,7	---	---	---	---	N	3112,7
Total	**7312,6**		**1000,0**		**701,7**		**5610,9**

Cálculo del peso del mineral (kilogramos)

Fe en arrabio = 1000 x 0,934 = 934

El 2% del Fe cargado → FeO

Fe cargado = 934/0,98 = 953,1
FeS = 1000 x 0,02 = 20
Fe en FeS = 20 x 56/88 = 12,7
Fe en Fe_2O_3 = 953,1 – 12,7 = 940,4

Sea X = peso del mineral:

Fe en mineral = 0,76X x 112/160 = 0,532X = 940,4 ∴
X = peso del mineral = 940,4/0,532 = 1768 Kg.

Carga (Kg.):

Mineral:
Fe_2O_3 = 1768 x 0,76 = 1343,7
MnO_2 = x 0,03 = 53,0
SiO_2 = x 0,11 = 194,5
Al_2O_3 = x 0,03 = 53,0
P_2O_5 = x 0,01 = 17,7
H_2O = x 0,04 = 70,7 ; CaO = 1768 x 0,02 = 35,4

Coque = 1000
C = 1000 x 0,86 = 860
SiO_2 = x 0,09 = 90
Al_2O_3 = x 0,01 = 10
FeS = x 0,02 = 20
H_2O = x 0,02 = 20

Cálculo de la piedra caliza:

Si en arrabio = 1000 x 0,009 = 9
SiO_2 reducido = 9 x 60/28 = 19,3
O de este = 19,3 – 9 = 10,3

Sea X = peso de la piedra caliza:

(1) $SiO_2 \rightarrow$ escoria = 194,5 + 90 + 0,01X – 19,3 = 265,2 + 0,01X

S cargado = 20 – 12,7 = 6,3
S en arrabio = 1000 x 0,001 = 1
$S \rightarrow CaS$ = 7,3 – 1 = 6,3
CaS = 6,3 x 72/32 = 14,2
$Ca \rightarrow CaS$ = 14,2 – 6,3 = 7,9
$CaO \rightarrow CaS$ = 7,9 x 56/40 = 11,1: O = 11.1 – 7,9 = 3,2
(2) $CaO \rightarrow$ escoria = 35,4 + 0,5X – 11,1 = 24,3 + 0,5X

Igualando (1) y (2):

265,2 + 0,01X = 24,3 + 0,05X ∴
X = Peso de la pirdea caliza = 491,6

Piedra caliza:

CaO = 491,6 x 0,5 = 245,8
MgO = x 0,05 = 24,6
Al_2O_3 = x 0,01 = 4,9
SiO_2 = x 0,01 = 4,9
CO_2 = x 0,43 = 211,4

Productos (Kg.):

Escoria = FeO + MnO + SiO_2 + P_2O_5 + CaO + CaS + Al_2O_3 + MgO

$Fe \rightarrow FeO$ = 953,1 – 934 = 19,1
FeO = 19,1 x 72/56 = 24,4
O de este = 24,6 – 19,1 = 5,5
Fe del $Fe_2O_3 \rightarrow FeO$ = 19,1 – 12,7 = 6,4
Fe del $Fe_2O_3 \rightarrow$ arrabio = 940,6 – 19,1 = 921,3
O del Fe_2O_3 = 1343,7 – 940,4 = 403,3
O del $Fe_2O_3 \rightarrow$ gas = 403,3 – 5,5 = 397,8

Mn en arrabio = 1000 x 0,0105 = 10,5
MnO_2 reducido = 10,5 x 87/55 = 16,6
O de este = 16,6 – 10,5 = 6,1
$MnO_2 \rightarrow MnO$ (escoria) = 53 – 16,6 = 36,4
MnO en escoria = 36,4 x 71/87 = 29,7
O de este (MnO_2) = 36,4 – 29,7 = 6,7
O aportado por el MnO_2 = 6,1 + 6,7 = 12,8

Si en arrabio = 9
SiO_2 reducido = 9 x 60/28 = 19,3
O de este = 19,3 – 9 = 10,3
$SiO_2 \rightarrow$ escoria = 194,5 + 90 + 4,9 – 19,3 = 270,1

P en arrabio = 1000 x 0,0075 = 7,5
P_2O_5 reducido = 7,5 x 142/62 = 17,2
O de este = 17,2 – 7,5 = 9,7
$P_2O_5 \rightarrow$ escoria = 17,7 – 17,2 = 0,5
$CaO \rightarrow$ escoria = 24,3 + 0,5 x 491,6 = 270,1

Gases = $CO + CO_2 + N_2$

En alto horno:
Reducción directa: MO + C = M + CO
Reducción indirecta: MO + CO = M + CO_2

C consumido en toberas = 860 x 0,82 = 705,5
O del soplo = 705,2 x 16/12 = 940,3
Soplo = 940,3/0,232 = 4053 Kg.
N = 4053 x 0,768 = 6112,7
O aportado por la carga sólida sin contar el CO_2 = 3,2 + 10,3 + 397,8 + 12,8 + 9,7 = 433,8
O total aportado sin CO_2 no H_2O = 940,3 + 433,8 = 1374,1

C (reducción directa) $\rightarrow$ CO = 860 – 705,2 – 38 = 116,8
C total $\rightarrow$ CO = 705,2 + 116,8 = 822
O de este = 822 x 16/12 = 1096
CO total = 1096 x 28/16 = 1918
CO (reducción directa) = 116,8 x 28/12 = 272,5
O de este = 272,5 – 116,8 = 155,7
O (reducción indirecta) = 433,8 – 155,7 = 278,1

$CO \rightarrow CO_2$ = 278,1 x 28/16 = 486,7
CO_2 formado = 486,7 x 44/28 = 764,8

CO en gas = 1918 – 486,7 = 1431,3
CO_2 total = 764,8 + 211,4 = 976,2

2.

Composición de la escoria (37-2)

FeO =	24,6 Kg. =	3,5%
MnO =	29,7 Kg. =	4,2%
SiO_2 =	270,1 Kg. =	38,5%
P_2O_5 =	0,5 Kg. =	0,1%
Al_2O_3 =	67,9 Kg. =	9,7%
CaO =	270.1 Kg. =	38,5%
CaS =	14,2 Kg. =	2,0%
MgO =	24,6 Kg. =	3,5%
	701,7 Kg.	100,0%

Composición del gas (37-2)

CO =	1431,3 Kg. =	1145,04 m^3 =	27,0%
CO_2 =	976,2 Kg. =	497,00 m^3 =	11,7%
N_2 =	3112,7 Kg. =	2490,16 m^3 =	58,6%
H_2O =	90,7 Kg. =	112,90 m^3 =	2,7%
	5610,9 Kg. =	4245,10 m^3 =	100,0%

Composición del gas (38-3)

CO	= 453,6 m^3 = 60,3%
CO_2	= 101,2 m^3 = 13,5%
N_2	= 197,5 m^3 = 26,2%
Total gas	= 752,3 m^3 = 100,0%

4.
Poder calorífico del carbón = 320 x 8100 = 2'592.000 Kcal.
Poder calorífico del gas (CO) = 453,6 x 3034 = 1'376.222,4 Kcal.

Poder calorífico del gas = 1'376.222,4/2'592.000 = 0,531

Poder calorífico del gas = 53,1% del de C (38-4)

5.
Poder calorífico del gas = 0,603 x 3034 = 1830 Kcal./m^3
Gas total = 752,3 x 30 = 22569 m^3
Poder calorífico total del gas = 22569 x 1830 = 41'301.270 Kcal./día.
= 41'301.270 / 24 = 1'720.886 Kcal./hr.

1 Kw = 860 Kcal./hr.

Kilovatios totales = 0,25 x 1'720.886/860 = 500

Kilovatios obtenidos en las máquinas a gas = 500 (38-5)

EJERCICIO N°39 (7)

Un cubilote utilizado para producir fundición de hierro, es cargado con arrabio, fundente y coque. El fundente es $CaCO_3$ puro y se cargan 25 kilogramos, por tonelada de arrabio, El coque contiene 86&C; 5%SiO_2; 7%Al_2O_3 y 2%FeO, y se cargan 120 kilogramos por tonelada de arrabio.

El gas del cubilote contiene partes iguales de CO y CO_2 por volumen. El carbono del arrabio no se oxida.

La escoria contiene:

FeO	11%	SiO_2	46%
MnO	3	CaO	25
Al_2O_3	15		

La fundición de hierro producida contiene 3,8%C, además de algo de manganeso y de silicio.

PREGUNTAS

1. El peso de la escoria, por tonelada de arrabio cargado.
2. El volumen de aire consumido en la oxidación del silicio, el manganeso y el hierro, por tonelada de arrabio cargado.
3. El volumen de aire consumido en la oxidación del carbono del coque, por tonelada de arrabio.
4. El volumen y composición del gas, por tonelada de arrabio.

SOLUCION

1.
Al_2O_3 en coque = Al_2O_3 en escoria

Al_2O_3 en coque = 0,07 x 120 = 8,4 Kg.

Escoria = 8,4/0,15 = 56 Kg.

Peso de la escoria = 56 Kg./ton. de arrabio. (39.1)

2.
FeO en coque = 120 x 0,02 = 2,4 Kg.
FeO en escoria = 56 x 0,11 = 6,16 Kg.
FeO producto de oxidación = 6,16 – 2,4 = 3,67 Kg.
O necesario = 3,76 x 16/72 = 0,84 Kg.

MnO en escoria = 56 x 0,03 = 1,68 Kg.
O requerido para oxidar el Mn = 1,68 x 16/71 = 0,38 Kg.

SiO_2 cargado = 120 x 0,05 = 6,0 Kg.
SiO_2 en escoria = 56 x 0,46 = 25,76 Kg.
SiO_2 producto de oxidación = 25,76 – 6 = 19,76 Kg.
O requerido = 19,76 x 32/60 = 10,5 Kg.

O del aire = 10,5 + 0,84 + 0,38 = 11,72 Kg. = 8,21 m^3

Aire = 8,21/0,21 = 39 m^3

Aire requerido para oxidar: Si, Mn y Fe = 39 m^3 (39-2)

3.
C del coque = 120 x 0,86 = 103,2 Kg.
C del $CaCO_3$ = 25 x 0,12 = 3 Kg.
C total en gas = 103,2 + 3 = 106,2 Kg.
$C \rightarrow CO = C \rightarrow CO_2$ = 106,2/2 = 53,1 Kg.
C del coque para CO_2 = 53,1 – 3 = 50,1 Kg.

O del CO = 53,1 x 16/12 = 71 Kg.
O para oxidar el C a CO_2 = 50,1 x 32/12 = 134 Kg.
O total para oxidar el C = 71 + 134 = 205 Kg. = 143,5 m^3

Aire = 143,5/0,21 = 682 m^3

Aire requerido para oxidar el C del coque = 682 m^3 (39.3)

4.

Volumen y composición del gas (39-4)

CO = 53,1 + 71 = 124,1 Kg.	= 99,5 m^3	= 12,9%
CO_2 = 50,1 + 134 + 25x0,44 = 195,1 Kg.	= 99,5 m^3	= 12,9%
N_2 = (682 + 39) x 0,79	= 569,6 m^3	= 74,2%
Total gas	= 768 m^3	= 100,0%

EJERCICIO N°40 (7)

El arrabio tratado en un cubilote tenía la siguiente composición:

Fe	91,0%	C	3,6%
Si	2,0	Mn	0,7
P	0,7	Lodo	2,0

El lodo en el arrabio consistía en arena y arcilla, el cual analizado contenía 75%SiO_2 y 25%Al_2O_3. La temperatura de la fundición fue de 1300°C con un punto de fusión de 1180°C.

Se utilizaron 25 kilogramos de piedra caliza, por tonelada de arrabio, y su análisis mostró 98%$CaCO_3$, 1%SiO_2 y 1%Al_2O_3.

El peso del coque utilizado fue de 125 kilogramos, por tonelada de arrabio, y al analizarlo contenía: 90%C; 5%SiO_2; 3%Al_2O_3 y 2%FeO.

Los análisis de la escoria y los gases producidos se muestran a continuación:

Gas	
CO_2	14%
CO	10
N_2	76

Escoria	
FeO	11%
SiO_2	46
MnO	3
CaO	25
Al_2O_3	15

La temperatura del gas al salir del horno fue de 440°C

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producido y el soplo utilizado, por tonelada de arrabio fundido.
2. Los porcentajes de Fe, Mn y Si del arrabio que fueron oxidados durante lafusión.
3. El peso de la fundición producida.
4. El porcentaje de la potencia calorífica del coque representado por el contenido de calor de la fundición.
5. El porcentaje de la potencia calorífica del coque, perdido en los gases (a) en el calor sensible; (b) por combustión inperfecta.

SOLUCION

1.

Gas = CO + CO_2 + N_2

$CaCO_3$ = 25 x 0,98 = 24,5 Kg.
CO_2 de este = 24,5 x 0,44 = 10,78 Kg.

Vamos a utilizar la expresión (1):

C en $CaCO_3$ = 24,5 x 0,12 = 2,94 Kg.
C en coque = 125 x 0,9 = 112,5 Kg.
C total en gas = 112,5 + 2,94 = 115,44 Kg.

C en gas = (0,14 + 0,10) x 12/22,4 = 0,129 Kg./m^3 de gas.

Gas = 115,44/0,129 = 896 m^3

Volumen del gas = 896 m^3/ton. de arrabio (40-1)

N_2 en gas = N_2 en soplo

Soplo = 896 x 0,76/0,79 = 862 m^3

Volumen del soplo = 862 m^3 (40-1)

2.

Para saber que cantidad de cada elemento se oxidó, debemos calcular el peso de la escoria.

CaO en $CaCO_3$ = CaO en escoria:

CaO en $CaCO_3$ = 24,5 x 0,56 = 13,72 Kg.

Escoria = 13,72/0,25 = 54,88 Kg.

FeO en escoria = 54,88 x 0,11 = 6,04 Kg.
FeO cargado = 125 x 0 02 = 2,5 Kg.
FeO producto de oxidación = 6,04 – 2,5 = 3,54 Kg.
Fe oxidado = 3,54 x 56/72 = 2,75 Kg.
Fe en arrabio = 1000 x 0,91 = 910 Kg.
Porcentaje de oxidación del Fe = 100 x (2,75/910) = 0,30

Fe oxidado = 0,30% (40-2)

Lodo = 1000 x 0,02 = 20 Kg.
SiO_2 en este = 20 x 0,75 = 15 Kg.
SiO_2 en fundente = 25 x 0,01 = 0,25 Jg.
SiO_2 en coque = 125 x 0,05 = 6,25 Kg.
SiO_2 total cargado = 15 + 0,25 + 6,25 = 21,50 Kg.
SiO_2 en escoria = 54,88 x 0,46 = 25,25 Kg.
SiO_2 porducto de oxidación = 25,25 – 21,50 = 3,75 Kg.
Si oxidado = 3,75 x 28/60 = 1,75 Kg.
Si del arrabio = 1000 x 0,02 = 20 Kg.

Porcentaje de oxidación del Si = 100 x (1,75/20) = 8,75
Si oxidado = 8,75% (40-2)

MnO en escoria = 54,88 x 0,03 = 1.65 Kg.
Mn oxidado = 1,65 x 55/71 = 1,28 Kg.
Mn en arrabio = 1000 x 0,007 = 7 Kg.

Porcentaje de oxidación del Mn = 100 x (1,28/7) = 18,2%
Mn oxidado = 18,2% (40-2)

3.
Fundición de hierro = Fe + C + Si + Mn + P

Fe = 910 – 2,75 = 907,25 Kg.
C = 1000 x 0,036 = 36 Kg.
Si = 20 – 1,75 = 18,35 Kg.
Mn = 7 – 1,28 = 5,72 Kg.
P = 1000 x 0,07 = 7 Kg.

Fundición = 907,25 + 36 + 18,35 + 5,72 + 7 = 874,22 Kg.
Peso de la fundición = 874,22 Kg./ton. de arrabio (40-3)

4.
Potencia calorífica del coque = 8100 x 0,9 x 125 = 911250 Kcal.

En la Tabla XVII del Apéndice, aparecen los datos siguientes:

Contenido de calor (por encima de 0°C) del arrabio (o fundición) líquido en su punto de fusión = 230 Kcal./Kg.
Calor específico del líquido = 0,15

Contenido de calor de la fundición = 974 x 230 + 974 x 0,15 x (1300 – 1180) = 241552 Kcal.

Contenido de calor de la fundición = 241552/911250 = 0,265
Contenido de calor de la fundición = 26,5% de la P.C.B del coque (40-4)

5.a
Calor sensible en el gas:

CO_2 = 0,14 x 896 x (0,406 + 9x10^{-5}x 440) x 440 = 24594 Kcal.
CO + N_2 = 0,86 x 896 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 440) x 440 = <u>105674 Kcal.</u>
Calor sensible total en el gas = 130268 Kcal.

Calor perdido en el gas = 130268/911250 = 0,143
Calor perdido en el gas = 14,3% de P.C.B del coque. (40-5.a)

5.b
La reacción de combustión incompleta es:

$C + ½ O_2 = CO$

C en CO = 896 x 12/22,4 = 48 Kg.
Calor de combustión = 48 x 2430 = 116640 Kcal.

La reacción de combustión completa es:

$C + O_2 = CO_2$

Calor de combustión = 48 x 8100 = 388800 Kcal.

Pérdida por combustión imperfecta = 388800 – 116640 = 272160 Kcal.

Pérdida por combustión imperfecta = 272160/911250 = 0,299

Pérdida por combustión imperfecta = 29,9% de O.C.B del coque (40-5.b)

EJERCICIO N°41 (7)

Un cubilote procesa por hora 15 toneladas cortas de una fundición de hierro que contiene:

C	3,5%	Mn	0,8%
Si	2,2	P	0,7

Adicionalmente procesa 5 toneladas cortas de una chatarra que contiene:

C	3,0%	Mn	1,1%
Si	1,8	P	0,2

El soplo es computado sobre las bases de 30000 pies cúbicos, medidos a 40°C, requeridos para fundir 1 tonelada de hierro y chatarra cargados por minuto. Asumir que el aire está seco.

En la fusión se oxidan 20% del Si cargado en la fundición de hierro y la chatarra, 15% del Mn, 1% del Fe y no hay oxidación del P; 5% del C también se oxida, pero 1% del C del coque es absorbido por el hierro en la fundición.

Se carga suficiente $CaCO_3$ para producir una escoria con 30%CaO. El coque tiene92%C, 8%SiO_2 y la relación del peso del coque al peso del arrabio y la chatarra cargados es 1:9.

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas del cubilote para 5 horas de operación.
2. La composición (%) de la fundición, la escoria y los gases resultantes.

SOLUCION

1.
El cuadro con el balance de cargas del horno, aparece en la página siguiente; apoyado en los cálculos que se dan más abajo.

Fundición cargada en 5 horas = 5 x 15 x 2000 = 150000 libras

C = 150000 x 0,035 = 5250
Si = " x 0,022 = 3300
Mn = " x 0,008 = 1200
P = " x 0,007 = 1050
Fe = " x 0,928 = 139200

BALANCE DE CARGAS (41-1)
(libras)

CARGA		PRODUCTOS					
		FUNDICION		ESCORIA		GASES	
Arrabio	**150000**						
C	5250	C	4987,5	---	---	C	262,5
Si	3300	Si	2640,0	Si	660,0	---	---
Mn	1200	Mn	1020,0	Mn	180,0	---	---
P	1050	P	1050,0	---	---	---	---
Fe	139200	Fe	137808,0	Fe	1392,0	---	---
Chatarra	**50000**						
C	1500	C	1425,0	---	---	C	75,0
Si	900	Si	720,0	Si	180,0	---	---
Mn	550	Mn	467,5	Mn	82,5	---	---
P	100	P	100,0	---	---	---	---
Fe	46950	Fe	46480,5	Fe	469,5	---	---
Coque	**22222**						
C	20444	C	204,4	---	---	C	20239,6
SiO_2	1778	---	---	SiO_2	1778,0	---	---
$CaCO_3$	**4829,3**	---	---	CaO	2704,4	CO_2	2124,9
Soplo	**210204**						
N	161224	---	---	---	---	N	161224,0
O	48980	---	---	O	1568,0	O	47412,0
Total	**437255,3**		**196902,9**		**9014,4**		**231338,0**

Chatarra cargada = 5 x5 x 2000 = 50000 libras.

Fe = 50000 x 0,939 = 46950
C = " x 0,030 = 1500
Si = " x 0,018 = 900
Mn = " x 0,011 = 550
P = " x 0,002 = 100

Arrabio + chatarra = 150000 + 50000 = 200000 libras

$\frac{\text{Coque}}{200000} = \frac{1}{9}$ ∴ peso del coque = 200000 / 9 = 22222 libras.

Coque = 22222 libras:
C = 22222 x 0,92 = 20444
SiO_2 = 22222 x 0,08 = 1778

Distribución de la carga:

Si (chatarra + fundición) = 3300 + 900 = 4200
Si oxidado a SiO_2 = 4200 x 0,20 = 840
SiO_2 formado = 840 x 60/28 = 1800
Si total a escoria = 1800 + 1778 = 3578
Si en fundición final = 4200 – 840 = 3360
Si de arrabio → SiO_2 = 840 x 3300/4200 = 660
Si de chatarra → SiO_2 = 840 x 900/4200 = 180
Si de arrabio → fundición final = 3300 – 660 = 2640
Si de chatarra → fundición final = 900 – 180 = 720
SiO_2 procedente del arrabio = 660 x 60/28 = 1414,3
SiO_2 procedente de la chatarra = 180 x 60/28 = 385,3

Mn (arrabio + chatarra) = 1200 + 550 = 1750
Mn oxidado = 1750 x 0,15 = 262,5
MnO de este = 262,5 x 71/55 = 338,9
Mn en fundición final = 1750 – 262,5 = 1487,5
Mn del arrabio → MnO = 252,5 x 1200/1750 = 180
Mn de la chatarra → MnO = 262,5 x 500/1750 = 82,5
Mn del arrabio → fundición final = 1200 – 180 = 1020
Mn de la chatarra → fundición final = 550 – 82,5 = 467,5
MnO procedente de arrabio = 180 x 71/55 = 232,4
MnO procedente de la chatarra = 82,5 x 71/55 = 106,5

P → fundición final = 1050 + 100 = 1150

Fe (arrabio + chatarra) = 139200 + 46950 = 186150
Fe oxidado = 186150 x 0,01 = 1861,5
FeO de este = 1861,5 x 72/56 = 2393,4
Fe → fundición final = 186150 – 1861,5 = 184288,5
Fe del arrabio → FeO = 1861,5 x 139200/186150 = 1392
Fe de la chatarra → FeO = 1861,5 x 46950/186150 = 469,5
Fe del arrabio → fundición final = 139200 – 1392 = 137808
Fe de la chatarra → fundición final = 46950 – 469,5 = 46480,5
FeO procedente del arrabio = 1392 x 72/56 = 1789,7
FeO procedente de la chatarra = 469,5 x 72/56 = 603,6

C (arrabio + chatarra) = 5250 + 1500 = 6750
C de estos oxidado = 6750 x 0,05 = 337,5
C del coque oxidado = 20444 x 0,99 = 20239,6
C total oxidado = 20239,6 + 337,5 = 20577,1
C (arrabio + chatarra) → fundición final = 6750 – 337,5 = 6412,5
C total → fundición final = 6412,5 + 20444 x 0,01 = 6616,94
C del arrabio oxidado = 337,5 x 5250/6750 = 262,5
C de la chatarra oxidado = 337,5 x 1500/6750 = 75
C del arrabio → fundición final = 5250 – 262,5 = 4978,5
C de la chatarra → fundición final = 1500 – 75 = 1425
C del coque → fundición final = 20444 x 0,01 = 204,44

Con los datos calculados hasta ahora más algunos que aparecerán más adelante, se configura el balance de cargas del horno.

2.

Composición de la fundición final (41-2):

Fe =	184288,5 libras	=	93,62%
Si =	3300,0 "	=	1,68%
Mn =	1487,5 "	=	0,76%
P =	1150,0 "	=	0,58%
C =	6616,9 libras	=	3,36%
	196842,9 libras	=	100,00%

Escoria = SiO_2 + MnO + FeO + CaO

Escoria sin CaO = 3578 + 338,9 + 2393,4 = 6310,3 = 70%
Escoria total = 6310,3/0,7 = 9014,7

CaO = 9014,7 – 6310,3 = 2704,4
$CaCO_3$ = 2704,4 x 100/56 = 4829,3
CO_2 de este = 4829,3 – 2704,4 = 2124,9

- **Composición de la escoria** (41-2):
  FeO = 2393,4 libras = 26,55%
  SiO_2 = 3578,0 " = 39,69%
  MnO = 338,9 " = 3,76%
  CaO = 2704,4 " = 30,00%
  9014,7 libras = 100,00%

Gas = CO + CO_2 + N_2

Cálculo del soplo:

Arrabio + chatarra = 15 + 5 = 20 ton./min.

Soplo = 30000 $\frac{ft^3}{Ton.\cdot min.}$

Soplo total = 30000 x (ft^3/ton./min) x 20 x(ton./hr.) x 5 hr. = 3'000.000 ft^3/min.

Oxígeno utilizado en oxidación de elementos:

O para FeO = 2393,4 x 16/72 = 531,9
O para SiO_2 = 1800 x 32/60 = 960,0
O para MnO = 338,8 x 16/71 = 76,4
1568,3 libras

Oxígeno para oxidación de elementos = 1568,3 x (359/32) = 15594,4 ft^3 en 5 horas.

Cambio del soplo a condiciones normales:

T_1 = 40 + 273 = 313K T_2 = 273K
V_1 = 3'000.000 ft^3 V_2 =?

$V_2 = V_1 \times (T_2/T_1)$ = 2'616.613 ft^3

N_2 = 2'616.613 x 0,79 = 2'067.124
O_2 = " x 0,21 = 549.489

La reacción que ocurre en el cubilote en la zona de toberas es:

$C + O_2 = CO_2$

$O_2 \rightarrow CO_2$ = 549489 – 17595 = 531894 ft^3
C = 531894 x 12/359 = 17779 lbs.
C $\rightarrow$ CO = 20577 – 17779 = 2798

La formación del CO se produce de acuerdo a la siguiente reacción:

$CO_2 + C = 2CO$

CO = 2798 x 2 x 359/12 = 167414 ft^3
CO_2 de este = 167414/2 = 83707 ft^3
CO_2 en gas = 531894 – 83707 + 2124,9 x 359/44 = 465524 ft^3

Composición del gas (41-2)
N_2 = 2'067.124 ft^3 = 76,56%
CO_2 = 465.524 ft^3 = 17,24%
CO = 167.414 ft^3 = 6,20%
2'700.062 ft^3 = 100,00%

EJERCICIO N°42 (9)

Un producto sinterizado que ha de ser tratado en un alto horno analizó: 8%CaO, 25%SiO_2 y 15%Fe.

Al fundir este sinterizado se desea producir una escoria con CaO, FeO y SiO_2 en las proporciones de:

$$CaO : FeO : SiO_2 = 4 : 6 : 7$$

Para obtener esta escoria, se añaden a la carga, mineral de hierro y piedra caliza de las siguientes composiciones:

	%Fe	%CaO	%SiO_2
Mineral de Fe:	45,0	0,5	15,0
Piedra caliza:	2,0	46,0	8,0

Además se añade a la carga, coque como combustible, en una cantidad igual al 12% del peso del sinterizado + mineral de Fe + piedra caliza.

El coque contiene: 2,5%Fe_2O_3; y 12,0%SiO_2

Supongamos que toda la caliza, Fe y SiO_2 , pasan a la escoria como CaO, FeO y SiO_2.

PREGUNTAS

1. Calcular los pesos del mineral de hierro, la piedra caliza y el coque a emplear por 2000 libras de sinterizado.

SOLUCION

1.

Sinterizado = 2000 libras:
CaO = 2000 x 0,08 = 160
SiO_2 = 2000 x 0,25 = 500
Fe = 2000 x 0,15 = 300

Para este cálculo vamos a utilizar el método algebráico. El sistema de ecuaciones que formularemos más adelante, se apoyará en consideraciones como las siguientes:

Relación $CaO:FeO:SiO_2 = 4:6:7$ ∴

6 x peso de SiO_2 = 7 x peso de FeO
4 x peso de SiO_2 = 7 x peso de CaO

Sean:
X = peso del mineral de hierro
Y = peso de la piedra caliza

Peso del coque = 0,12 x (2000 + X + Y) = 240 + 0,12X + 0,12Y

Cálculo del FeO formado:

FeO del sinterizado = 300 x 72/56 = 85,71 libras
FeO del mineral de Fe = 0,45X · (72/56) = 0,5786X libras
FeO de la piedra caliza = 0,02Y · (72/56) = 0,0357Y libras.

Para el coque:

$Fe_2O_3 = 2FeO + O$
FeO del coque = (240 + 0,12X + 0,12Y) x 0,025 x 144/160 = 5,4 + 0,0027X + 0,0027Y

FeO total formado = 385,71 + 0,5786X + 0,0257Y + 5,4 + 0,0027X + 0,0027Y
= 391,11 + 0,5813X + 0,0284Y

SiO_2 cargado = 500 + 0,15X + 0,08Y + 0,12 · (240 + 0,12X + 0,12Y)
= 528,8 + 0,1644X + 0,0944Y

CaO cargado = 160 + 0,005X + 0,46Y

De conformidad con las relaciones establecidas anteriormente:

(1) 6 x (528,8 + 0,1644X + 0,0944Y) = 7 x (391,11 + 0,5813X + 0,0284Y)
(2) 4 x (528,8 + 0,1644X + 0,0944Y) = 7 x (160,00 + 0,0050X + 0,46Y)

Desarrollando y despejando, obtendremos el siguiente sistema de ecuaciones:

(1) 453,03 = 3,0827X – 0,3676Y
(2) 995,20 = - 0,6226X + 2,8424Y

Resolviendo este sistema de ecuaciones obtenemos:
X = 187,78 libras
Y = 391,26 libras
Coque = 0,12 x (2000 + 187,78 + 391,26) = 309,5 libras.

Peso del mineral de hierro = 187,78 libras (42-1)
Peso de la piedra caliza = 391,26 libras (42-1)
Peso del coque = 309,5 libras (42-1)

CAPITULO VIII

PRODUCCION DE ACEROS

EJERCICIO N°1 (7)

Un convertidor Bessemer-ácido trata 15 toneladas de arrabio en 12 minutos. Se oxidan las siguientes impurezas:

C	4,0%
Si	1,8
Mn	0,8

También se oxida el 3% del hierro. Asumir que el hierro es oxidado a una rata uniforme y que tres cuartos del C pasan a CO y un cuarto a CO_2.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire requerido.
2. La duración de cada uno de los dos períodos del soplado.
3. El peso de la escoria producida.

SOLUCION

1.

En este proceso, el arrabio se carga al convertidor en estado líquido, y se introduce un soplo de aire frío con el fin de oxidar todas las impurezas. A pesar de que no se carga ningún combustible, la carga y los productos se mantienen líquidos debido al calor generado por la oxidación de las impurezas.

Se tratan en este tipo de convertidores, arrabios con muy poco o ningún P, pero altos en Si.

El proceso bessemer-ácido se considera dividido en 2 períodos, el primero incluye la oxidación de todo el Si y el Mn, que por tener relativamente mayor afinidad por el oxígeno que el C, se oxidan primero. Durante el segundo período se oxida el C. Ocurre alguna oxidación del Fe en virtud de la gran cantidad que hay de este elemento en el arrabio y para efectos de cálculos, se asume que este se oxida a una *rata uniforme* durante c/u de los dos períodos.

Con estas aclaraciones, procedamos a realizar los respectivos cálculos:

Arrabio = 15000 Kg.

$Si \rightarrow SiO_2$ = 15000 x 0,018 = 270 Kg.
O de este = 270 x 32/28 = 309 Kg.

$Mn \rightarrow MnO$ = 15000 x 0,008 = 120 Kg.
O de este = 120 x 16/55 = 35 Kg.

C en arrabio = 15000 x 0,04 = 600 Kg.
$C \rightarrow CO$ = 600 x ¾ = 450 Kg.
O de este = 450 x 16/12 = 600 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 600 – 450 = 150 Kg.
O de este = 150 x 32/12 = 400 Kg.

Fe en arrabio = 100 – 4 – 1,8 – 0,8 = 93,4%
Fe en arrabio = 15000 x 0,934 = 14010 Kg.
$Fe \rightarrow FeO$ = 14010 x 0,03 = 420,3 Kg.
O de este = 420,3 x 16/56 = 120 Kg.

O total para oxidación = 309 + 35 + 600 + 400 + 120 = 1464 Kg. = 1024,8 m^3

Aire = 1024,8/0,21 = 4880 m^3

Volumen de aire requerido = 4880 m^3 (1-1)

2.

Para este cálculo, distribuimos el tiempo total del proceso proporcionalmente al oxígeno empleado o consumido en cada período y como el Fe se oxida a rata uniforme durante todo el proceso; a cada período le corresponderá una proporción proporcional de oxidación de este elemento.

Primer período = oxidación del Si + Mn + algo de Fe.

O del Mn + Si = 309 + 35 = 344 Kg.
Tiempo del primer período sin oxidación de Fe = 12 x (344/1464) = 2,82 min.

O del CO + CO_2 = 600 + 400 = 1000 Kg.
Tiempo del segundo período sin oxidación del Fe = 12 x (1000/1464) = 8,20 min.

Tiempo del 1° + 2° períodos sin oxidación del Fe = 2,82 + 8m20 = 11,02 min.

O del Fe = 120 Kg.
Tiempo de oxidación del Fe = 12 x (120/1464) = 0,98 min.

Tiempo del 1° período con oxidación del Fe = 2,82 + 0,98 x (2,82/11,02) = 3,1 min
Tiempo total del 1° período = 3,1 min. (1-2)

Tiempo del 2° período con oxidación del Fe = 8,20 + 0,98 x (8,20/11,02) = 8,9 min.
Tiempo total del 2° período = 8,9 min. (1-2)

3.
Escoria = SiO_2 + MnO + FeO

SiO_2 = 270 + 309 = 579,0 Kg.
MnO = 120 + 35 = 155,0 Kg.
FeO = 420,3 + 120 = 540,3 Kg.
1274,3 Kg.

Peso de la escoria producida = 1274,3 Kg. (1-3)

EJERCICIO N°2 (7)

Un convertidor Bessemer – ácido sopla 25 toneladas métricas de un arrabio que tiene la siguiente composición:

C	4,0%
Mn	1,2
Si	1,4
Fe	93,4

Además de las impurezas se oxida hierro equivalente al 2,5% del peso del arrabio, el cual es oxidado a una rata uniforme. Cinco octavos del carbono pasan a CO y tres octavos pasan a CO_2.

El soplo es suministrado a la rata de 700 metros cúbicos por minuto, medido a condiciones normales..

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado.
2. El tiempo de cada uno de los dos períodos.
3. El peso de la escoria.

SOLUCION

1.

El aire es utilizado solo para oxidar elementos y producir escoria.

Arrabio = 25000 Kg.

C = 25000 x 0,04 = 1000 Kg.
$C \rightarrow CO$ = 1000 x 5/8 = 625 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 1000 x 3/8 = 375 Kg.
Mn = 25000 x 0,012 = 300 Kg.
Si = 25000 x 0,014 = 350 Kg.
Fe oxidado = 25000 x 0,025 = 625 Kg.

O del CO = 625 x 16/12 = 833,3 Kg.
O del CO_2 = 375 x 32/12 = 1000 Kg.
O para oxidación del Mn = 300 x 16/55 = 87,3 Kg.
O para oxidación del Si = 350 x 32/28 = 400 Kg.
O para oxidación del Fe = 625 x 16/56 = 178,5 Kg.

O total consumido = 833,3 + 1000 + 87,3 + 400 + 178,5 = 2499,1 Kg. = 1749,37 m^3

Aire = **1749,37/0,21 = 8330,3 m^3**

Volumen de aire utilizado = 8330,3 m^3 (2-1)

2.

Rata de suministro de oxígeno = 700 x 0,21 = 147 m^3/min.
Rata de suministro de oxígeno = 147 x 32/22,4 = 210 Kg./min.

Durante el primer período hay oxidación del Si + Mn + algo de Fe.
O del 1° período sin oxidación de Fe = 400 + 87,3 = 487,3 Kg.

Durante el 2° período hay oxidación del C (a CO y CO_2) + algo de Fe.
O del 2° período sin oxidación del Fe = 1000 + 833,3 = 1833,3 Kg.

O de oxidación del Fe = 178,5 Kg.

Tiempo del 1° período sin oxidación del Fe = 487,3/210 = 2,32 min.
Tiempo del 2° período sin oxidación del Fe = 1833,3/210 = 8,74 min.
Tiempo total sin oxidación del Fe = 2,32 + 8,74 = 11,06 min.
Tiempo de oxidación del Fe = 178,5/210 = 0,85 min.

Tiempo total del 1° período con oxidación del Fe = 2,32 + 0,85 x 2,32/11,06 = 2,5 min.

Tiempo del 1° período = 2,5 min. (2-2)

Tiempo total del 2° período con oxidación del Fe = 8,74 + 0,85 x 8,74/11,06 = 9,4 min.

Tiempo del 2° período = 9,4 min. (2-2)

3.

Escoria = SiO_2 + MnO + FeO

MnO = 300 + 87,3 = 387,3 Kg.
SiO_2 = 350 + 400 = 750,0 Kg.
FeO = 625 + 178,5 = <u>803,5 Kg.</u>
1940,8 Kg.

Peso de la escoria = 1941,0 Kg. (2-3)

EJERCICIO Nº3 (7)

Un convertidor Bessemer es cargado con 18 toneladas métricas de arrabio, del cual son oxidadas las siguientes impurezas:

C	4,2%
Si	1,5
Mn	0,7

Se oxida también suficiente hierro como para producir una escoria con 24%FeO. Asumir que el hierro se oxida a una rata uniforme. La relación de CO a CO_2 en los gases es 3:1.

Las máquinas de soplado suministran por minuto 510 metros cúbicos de aire (medidos a condicione normales), el aire lleva 19 mm de vapor de agua.

PREGUNTAS

1. El tiempo de cada uno de los dos períodos del soplo.
2. El peso de la escoria.
3. la composición (%) de los gases en cada período.

SOLUCION

1.

Debemos calcular el peso de la escoria, para poder determinar la cantidad de FeO producido.

Escoria = MnO + SiO_2 + FeO.

Si oxidado = 18000 x 0,015 = 270 Kg.
O de este = 270 x 32/28 = 309 Kg.
SiO_2 producido = 270 + 309 = 579 Kg.

Mn oxidado = 18000 x 0,007 = 126 Kg.
O de este = 126 x 16/55 = 36,6 Kg.
MnO producido = 126 + 36,6 = 162,6 Kg.

Escoria sin FeO = 579 + 162,6 = 741,4 Kg. = 76%

FeO = 741,6 x 24/76 = 234,2 Kg.
O de este = 234,2 x 16/72 = 52,04 Kg.

C oxidado = 18000 x 0,042 = 756 Kg.
$C \rightarrow CO$ = 756 x ¾ = 567 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 756 x ¼ = 189 Kg.

O del CO = 567 x 16/12 = 756 Kg.
O del CO_2 = 189 x 32/12 = 504 Kg.

% de humedad = 100 x 19/760 = 2,5%

Aire seco = 510 x 0,975 = 497,25 m^3/min.
O del aire = 497,25 x 0,21 = 104,42 m^3/min.
O del aire = 104,42 x 22,4/32 = 149 Kg./min.

H_2O = 510 – 497,25 = 12,75 m^3/min.
O del H_2O = 12,75 x 16/22,4 = 9,11 Kg./min.

O total cargado = 149 + 9,11 = 158,11 Kg./min.

Tiempo del 1° período sin O del FeO = (309 + 36,6) / 158,11 = 2,18 min.

Tiempo del 2° período sin O del FeO = (756 + 504) / 158,11 = 7,97 min.
10,15 min.

Tiempo para oxidación del Fe = 52,04/158,11 = 0,33 min.

Tiempo total del 1° período = 2,18 + 0,33x(2,18/10,15) = 2,3 min.
Tiempo del 1° período = 2,3 min. (3-1).

Tiempo total del 2° período = 7,97 + 0,33 x (7,97/10,15) = 8,2 min.
Tiempo del 2° período = 8,2 min. (3-1)

2.
FeO = 234,2 Kg. = 24% de la escoria ∴
Escoria = 234,2/0,24 = 976 Kg.
Peso de la escoria = 976 Kg. (3-2)

3.
Gases producidos durante el 1° período = $N_2 + H_2$

Composición del gas producido durante el 1° período (3-3)
N_2 = 497,25 x 0,79 x 2,3 = 903,5 m^3 = 96,9%
H_2 = 12,75 x 2,3 = 29,3 m^3 = 3,1%
932,8 m^3 = 100,0%

Gas producido durante el 2° período = $N_2 + H_2 + CO + CO_2$

Composición del gas producido durante el 2° período (3-3)
N_2 = 497,25 x 0,79 x 8,2 = 3221,1 m^3 = 68,0%
H_2 = 12,75 x 8,2 = 104,6 m^3 = 2,2%
CO = 567 x 22,4/12 = 1058,4 m^3 = 22,4%
CO_2 = 189 x 22,4/12 = 352,8 m^3 = 7,4%
4736,9 m^3 = 100,0%

Nótese que en los gases del 2° período, se sigue conservando la relación CO : CO_2 = 3 : 1.

EJERCICIO N°4 (7)

Un convertidor Bessemer – ácido sopla 20 toneladas cortas de un arrabio que contiene 3,72%C; 2m18%Si; 1,24%Mn. En adición se oxida Fe en una cantidad equivalente al 4,8% del peso del arrabio. Asumir que el Fe es oxidado a una rata uniforme durante el soplado.

El aire entra a una presión de 2,5 atmósferas, manómetro, a una temperatura de 45°C y se encuentra un tercio saturado con humedad. Del convertidor no sale oxígeno libre. Dos tercios del carbono pasan a CO y el resto a CO_2. El soplado dura 10,5 minutos.

PREGUNTAS

1. El peso total de la escoria.

2. El volumen del aire a las condiciones dadas.

3. El tiempo de duración de cada período de soplado.

4. La composición de los gases en cada período.

SOLUCION

1.
Escoria = $FeO + SiO_2 + MnO$

Arrabio = 20 x 2000 = 40000 libras.

Fe en arrabio = 1000 – 3,72 – 2,18 – 1,24 = 92,86%

C = 40000 x 0,0372 = 1488
Si = 40000 x 0,0218 = 872
Mn. = 40000 x 0,0124 = 496
Fe = 40000 x 0,9286 = 37144

Fe → FeO = 40000 x 0,048 = 1920

FeO = 1920 x 72/56 = 2468,6
SiO_2 = 872 x 60/28 = 1868,6
MnO = 496 x 71/55 = 640,3
4977,5

Peso total de la escoria = 4977,5 libras (4-1)

2.
Vamos a utilizar la expresión:

$$ft^3 \text{ de aire} = \frac{O_2 \text{ total en aire}}{O_2 / \text{ft}^3 \text{ de aire}} \tag{1}$$

C → CO = 1488 x 2/3 = 992 libras
C → CO_2 = 1488 x 1/3 = 496 libras

C + ½ O_2 = CO: O = 992 x 16/12 = 1322,7 libras; O_2 = 14838,7 ft^3

C + O_2 = CO_2: O = 496 x 32/12 = 1322,7 libras; O_2 = 14838,7 ft^3

O del Fe = 2468,6 – 1920 = 548,6 libras; O_2 = 6154,6 ft^3

O del Si = 1868,6 – 872 = 996,6 libras; O_2 = 11180,6 ft^3

A del Mn = 640,3 – 496 = 144,3 libras; O_2 = 1618,9 ft^3
Total O del aire = 4334,9 libras; O_2 = 48631,5 ft^3

Condiciones del aire:

T = 45°C
P barométrica = 2,5 x 760 = 1900 mm.
Saturación del aire = 1/3 con vapor de agua.
Presión de saturación a 45°C = 71,9 mm
Presión real de H_2O = 71,9 x 1/3 = 23,97 mm
Presión de aire seco = 1900 – 23,97 = 1876,03 mm

Supongamos 1 ft^3 de aire seco:

Volumen de H_2O por ft^3 de aire seco = 1 x 23,97/1876,03 = 0,0128 ft^3

Aire húmedo = 1 + 0,0128 = 1,0128 ft^3.

Composición del aire húmedo:
Aire seco = 1,0000 ft^3 = 98,74%
Humedad = 0,0128 ft^3 = 1,26%
1,0128 ft^3 = 100,00%

Con esta composición, si introducimos al convertidor 1 ft^3 de aire húmedo, el H_2O se descompone en ½ O_2 + H_2 y el O_2 reacciona con las impurezas del arrabio para que no salga O_2 libre en los gases del convertidor, por tanto,

O_2/ft^3 de aire húmedo = 0,9874 x 0,21 + 0,0126/2 = 0,214

Volumen de aire húmedo a C.N = 48631,5 / 0,214 = 227250 ft^3

Cambio de condiciones:

V_1 = 227250 ft^3 V_2 =?
P_1 = 760 mm P_2 = 1900 mm
T_1 = 273K T_2 = 45 + 273 = 318K

$V_2 = V_1 \times (P_1/T_1) \times (T_2/P_1)$ = 105884 ft^3
Volumen de aire húmedo a las condicione dadas = 105884 ft^3 (4-2)

3.
Durante el primer período habrá oxidación del Si + Mn + algo de Fe
t_1 sin oxidación del Fe = 10,5 x (996,6 + 144,3)/4334,9 = 2,76 min.

Durante el segundo período habrá oxidación del C + algo de Fe.
t_2 sin oxidación del Fe = 10,5 x 1322,7 x 2/4334,9 = 6,41 min.
9,17 min.

Tiempo de oxidación del Fe = 10,5 x 548,6/4334,9 = 1,33 min

t_1 con oxidación de Fe = 2,79 + 1,33 x (2,76/9,17) = 3,16 min.
Tiempo de soplado del 1° período = 3,16 min. (4-3)

t_2 con oxidación del Fe = 6,41 + 1,33 x (6,41/9,17) = 7,34 min.
Tiempo de soplado del 2° período = 7,34 min. (4-3)

4.
Primer período:

En este período, los gases producidos son el N_2 proveniente del aire que oxida el Si, Mn y parte del Fe; así como el H_2 proveniente de la descomposición del H_2O.

O_2 de este período = 11180,6 + 1618,9 + 6154,6 x 3,16/10,5 = 14651,74 ft^3
Aire húmedo = 14651,74/0,214 = 68466 ft^3
Aire seco = 68466 x 0,9874 = 67603 ft^3
Humedad = 68466 x 0,0126 = 863 ft^3

Composición del gas durante el 1° período (4-4)
N_2 = 67603 x 0,79 = 53406 ft^3 = 98,41%
H_2 = 863 ft^3 = 1,59%
54269 ft^3 =100,00%

Gases del 2° período = N_2 + H_2 + CO + CO_2

O_2 = 14838,7 x 2 + 6154,6 x 7,34/10,5 = 33980 ft^3

Aire húmedo = 33980/0,214 = 158785 ft^3.

Composición del gas durante el 2° período (4-4)

N_2 = 158785 x 0,9874 x 0,79 = 123860 ft^3 = 72,69%
H_2 = 158785 x 0,0126 = 2001 ft^3 = 1,17%
CO = 14838,7 x 2 = 29678 ft^3 = 17,42%
CO_2 = 14838,7 x 1 = 14839 ft^3 = 8,71%
170378 ft^3

EJERCICIO N°5 (7)

Un convertidor Bessemer – ácido sopla una carga de 20 toneladas métricas de un arrabio que contiene:

C	3,6%
Mn	0,7
Si	1,2

Se oxida también hierro en una cantidad equivalente al 2,8% del arrabio. Dos tercios del C pasa a CO y un tercio a CO_2. Asumir que el hierro se oxida a una rata uniforme a través del soplado. El soplado tarda 13 minutos. Los gases salen del convertidor a 1500°C.

El calor de formación de la escoria es de 150 kilocalorías, por kilogramo de SiO_2.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire necesario para el soplado.
2. El tiempo de duración de cada uno de los dos períodos.
3. El peso de la escoria y el volumen de los gases producidos.
4. El calor generado por minuto en cada período.
5. El calor neto dejado por minuto en cada período, después de deducir el calor sacado por los gases.

SOLUCION

1.

Arrabio = 20000 Kg.

C = 20000 x 0,036 = 720
Mn = 20000 x 0,007 = 140
Si = 20000 x 0,012 = 240
Fe = 20000 x 0,945 = 18900

C → CO = 720 x 2/3 = 480
C → CO_2 = 720 – 480 = 240

Fe → FeO = 20000 x 0,028 = 560

O del CO = 480 x 16/12 = 640 Kg.
O del CO_2 = 240 x 32/12 = 640 Kg.
O del Mn = 140 x 16/55 = 40,7 Kg.
O del Si = 240 x 32/28 = 275 Kg.
O del Fe = 560 x 16/56 = 160 Kg.
O total del aire = 1755,7 Kg. =1229 m^3

Aire = 1229/0,21 = 5852 m^3

Aire necesario = 5852 m^3 (5-1)

2.

O del primer período sin el O del FeO = 40,7 + 275 = 315,7 Kg.
O del segundo período sin el O del FeO = 640 x 2 = 1280 Kg.

t_1 sin FeO = 13 x 315,7/1755,7 = 2,33 min.
t_2 sin FeO = 13 x 1280/1755,7 = 9,48 min.
11,81 min.
t_{FeO} = 13 x 160/1755,7 = 1,19 min.

t_1 con FeO = 2,33 + 1,19 x 2,33/1,81 = 2,6 min.
Tiempo de soplado del primer período = 2,6 min. (5-2)

t_2 con FeO = 9,48 + 1,19 x 9,48/11,81 = 10,4 min.
Tiempo de soplado del segundo período = 10,4 min. (5-2)

3.
Escoria = MnO + SiO_2 + FeO

MnO = 140 + 40,7 = 180,7 Kg.
SiO_2 = 240 + 275 = 515,0 Kg.
FeO = 560 + 160 = 720,0 Kg.
Escoria = 1415,7 Kg.

Peso de la escoria = 1415,7 Kg. (5-3)

Gas = CO + CO_2 + N_2

CO = 480 + 640 = 1120 Kg. = 896 m^3
CO_2 = 240 + 640 = 880 Kg. = 448 m^3
N_2 = 5852 x 0,79 = 4623 m^3
Gas = 5967 m^3

Volumen del gas = 5967 m^3 (5-3)

4.
En la Tabla XLII del Apéndice, se encuentran los calores de formación de los óxidos, por kilogramo de elemento oxidado.

Primer período:

Calor de oxidación del:
Si = 240 x 7160 = 1'718.400 Kcal.
Mn = 140 x 1757 = 245.980 Kcal.
Fe = 560 x (2,33/11,81) x 1151 = 127.166 Kcal.
Total calor de oxidación = 2'091.546 Kcal.

Suponiendo que los óxidos de Mn y Fe pasan a la escoria como silicatos, tendremos:

MnO + SiO_2 = MnO·SiO_2: SiO_2 = 180,7 x 60/71 = 152,7 Kg.
FeO = 720 x 2,33/11,81 = 142 kg.
FeO + SiO_2 = FeO·SiO_2: SiO_2 = 142 x 60/72 = 118,3 Kg.

Calores de formación de escoria:
MnO·SiO_2 = 152,7 x 150 = 22905 Kcal.
FeO·SiO_2 = 118,3 x 150 = 17745 Kcal.
40650 kcal.

Calor generado durante el 1° período = (2'091.546 + 40650) / 2,6 = 820075 Kcal./min.
Calor generado durante el 1° período = 820075 Kcal./min. (5-4)

Segundo período:

SiO_2 restante para neutralizar el FeO de este período = 515 – 152,7 – 118,3 = 244 Kg.
Calor de formación del FeO·SiO_2 = 244 x 150 = 36600 Kcal.

Calor de oxidación cuando:

$C \rightarrow CO = 480 \times 2430$ = 1'166.400 Kcal.
$C \rightarrow CO_2 = 240 \times 8100$ = 1'944.000 Kcal.
$Fe \rightarrow FeO = 560 \times (9{,}48/11{,}81) \times 1151$ = 517.934 Kcal.
3'628.334 Kcal.

Calor generado durante el 2° período = (3'628.334 + 36600)/10,4 = 352.398 Kcal./min.

Calor generado durante el 2° período = 352398 Kcal./min (5-4)

5.
El gas que sale durante el primer período es el N_2.

O del 1° período = 40,7 + 275 + 160 x (2,33/11,81) = 347,3 Kg.
N = 347,3 x 76,8/23,2 = 1150 Kg.

Calor sacado por el N = 1150 x (0,241 + 1,8 x 10^{-5}x1500) x 1500 = 462300 Kcal.

Calor neto dejado durante el 1° período = (2'091.546 + 40650 – 462300) / 2,6
= 642268 Kcal./min.

Calor neto dejado durante el 1° período = 642268 Kcal./min. (5-5)

Durante el segundo período, los gases que salen son: N_2, CO y CO_2.

O de este período = 1755,7 – 347,3 = 1408,4 Kg.
N = 1408,4 x (76,8/23,2) = 4662,2 Kg.
N + CO = 4662,2 + 1120 = 5782,2 Kg.

Calor sacado del convertidor por:

N + CO = 5782,2 x (0,241 + 1,8x10^{-5} x 1500) x 1500 = 2'333.118 Kcal.
CO_2 = 880 x (0,205 + 4,6x10^{-5} x 1500) x 1500 = 361.680 Kcal.
2'694.798 Kcal.

Calor neto dejado durante el 2° período = (3'628.334 + 36600 – 2'694.798) / 10,4
= 93282 Kcal./min.

Calor neto dejado durante el 2° período = 93282 Kcal./min. (5-5)

EJERCICIO N°6 (7)

Un convertidor bessemer trata 30 toneladas de arrabio, recibiendo 680 metros cúbicos de aire por minuto. Las impurezas removidas del arrabio son: 4%C; 1,8%Si; 1,6%Mn. Tres cuarto del carbono pasan a CO y es resto a CO_2. Hacia el final del soplo se han oxidado 900 kilogramos de hierro.

El calor específico del baño fundido es 0,20.

Los gases salen del convertidor a 1500°C. Despreciar el calor en el soplo cuando entra al convertidor.

PREGUNTAS

1. El tiempo total de soplado.
2. La rata promedio de calentamiento o enfriamiento del baño (grados centígrados por minuto) en cada período, asumiendo que la pérdida por radiación, convección y conducción es una cantidad constante e igual al 25% del calor total generado durante el primer período..

SOLUCION

1.
Arrabio = 30000 Kg.

C = 30000 x 0,04 = 1200 Kg.
Mn = 30000 x 0,016 = 480 Kg.
Si = 30000 x 0,018 = 540 Kg.

$C \rightarrow CO$ = 1200 x ¾ = 900 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 1200 x ¼ = 300 Kg.

O del CO = 900 x 16/12 = 1200,00 Kg.
O del CO_2 = 300 x 32/12 = 800,00 Kg.
O del Si = 540 x 32/28 = 617,14 Kg.
O del Mn = 480 x 16/55 = 139,60 Kg.
O del Fe = 900 x 16/56 = 257,14 Kg.
O total de oxidación = 3013,88 Kg.: O_2 = 2110 m^3

Aire = 2110/0,21 = 10047,6 m^3

Tiempo del soplo = 10047,6 / 680 = 14,8 min.
Tiempo total de soplado = 14,8 min. (6-1)

2.
Se debe calcular el tiempo de cada período para poder distribuir el Fe oxidado,

O que entra al convertidor = 680 x 0,21 x 32/22,4 = 204 Kg./min.

t_1 = tiempo del primer período.
t_2 = tiempo del segundo período.
t_{FeO} = tiempo de oxidación del FeO.

t_1 sin oxidación del Fe = (617,14 + 139,4)/204 = 3,71 min.
t_2 sin oxidación del Fe = (1200 + 800)/204 = 9,80 min.
13,51 min.

t_{FeO} = 257,14/204 = 1,26 min.

t_1 con oxidación del Fe = 3,71 + 1,26 x (3,71/13,51) = 4,06 min.
t_2 " " = 9,80 + 1,26 x (9,80/13,51) = 10,71 min.
14,77 min.

Distribución del Fe y del FeO por períodos:

FeO = 900 + 257 = 1157 Kg.

FeO (1°) = 1157 · (3,71/13,51) = 317,7 Kg.
FeO (2°) = 1157 · (9,8/13,51) = 839,3 Kg.

Fe (1°) = 900 · (3,71/13,51) = 247,2 Kg.
Fe (2°) = 900 · (9,8/13,51) = 652,8 Kg.

Primer período:

O = 139,6 + 617,14 + 247,2 · (16/56) = 827,4 Kg.
N = 827,4 · (76,8/23,2) = 2739 Kg.

Calor generado por oxidación de: (tabla XLII)

Si = 540 x 7160 = 3'866.400 Kcal.
Mn = 480 x 1757 = 843.360 Kcal.
Fe = 247,2 x 1151 = 284.527 Kcal.
4'994.287 Kcal.

Calor generado en la formación de escorias. Asumiendo 70 kilocalorías por kilogramo de MnO para la combinación MnO y SiO_2 y 120 kilocalorías por kilogramo de FeO para la combinación FeO y SiO_2 (7, pag. 132):

MnO = 480 + 139,6 = 619,6 Kg.
SiO_2 = 540 + 617,4 = 1157,4 Kg.
FeO (1°) = 317,7 Kg.

Calor generado al formarse:

MnO.SiO_2 = 619,6 x 70 = 43372 Kcal.
FeO.SiO_2 = 317,7 x 120 = 38124 Kcal.
81496 Kcal.

Total calor generado el 1° período = 4'994.287 + 81496 = 5'075.783 Kcal.

Pérdidas de calor del 1° período = 5'075.783 x 0,25 = 1'268.946 Kcal.

Calor sacado por gases:
N = 2739 x (0,241 + 1,8 x 10^{-5} x 1500) x 1500 = 1'101.708 Kcal.

Calor neto = 5'075.783 – 1'268.946 – 1'101.708 = 2'705.129 Kcal.

Este calor implica un aumento de temperatura.

$Q = W \cdot C_m \cdot t$

Q = calor neto = 2'705.129 Kcal.
W = Peso del baño = 30000 Kg.
Cm = calor específico del baño fundido = 0,2
t = °C.

t = 2'705.129/30000x0,2x4,06 = 111°C/min.

Aumento de temperatura durante 1° período = 111°C/min. (6-2)

Segundo período:

CO = 900 + 1200 = 2100 Kg.
CO_2 = 300 + 800 = 1100 Kg.
O (2°) = 1200 + 800 + 652,8 x (16/56) = 2186,5 Kg.
N(2°) = 2186,5 x (76,8/23,2) = 7238 Kg.

Calores generados cuando:

$C \rightarrow CO$ = 900 x 2430 = 2'187.000 Kcal.
$C \rightarrow CO_2$ = 300 x 8100 = 2'430.000 Kcal.
$Fe \rightarrow FeO$ = 652,8 x 1151 = 751.373 Kcal.
Total calor de oxidación = 5'368.373 Kcal.

Por formación FeO.SiO_2 = 893,3 x 120 = 100.716 Kcal.

Calor total generado = 5'368.373 + 100.716 = 5'469.089 Kcal.

Calor en los gases al salir del convertidor:

$CO = 2100 \cdot (0{,}242 + 1{,}8x10^{-5} \times 1500) \times 1500 =$ 847.350 Kcal.
$N_2 = 7238 \cdot (0{,}241 + 1{,}8x10^{-5} \times 1500) \times 1500 =$ 2'909.676 Kcal.
$CO_2 = 1100 \cdot (0{,}205 + 4{,}6x10^{-5} \times 1500) \times 1500 =$ 452.100 Kcal.
Total calor sacado por gases = 4'209.126 Kcal.

Calor neto = 5'469.089 – 4'209.126 = 1'259.963 Kcal.

Cambio en el calor neto (2°) – (1°) = 1'259.963 – 2,705.129 = - 1'445.166 Kcal.

t = - 1'445.166 / 30000 x 0,2 x 10,71 = - 22,5

Disminución de temperatura durante el 2° período = 22,5°C/min. (6-2)

EJERCICIO N°7 (7)

Una carga de 10000 kilogramos de arrabio es tratada en un convertidor Bessemer, produciendo 527 kilogramos de escoria de la siguiente composición: 65,5%SiO_2,; 13,5%MnO y 21,0%FeO. Los gases del convertidor totalizan 2760 metros cúbicos y contienen 6,0%CO_2; 18,1%CO y 75,9%N_2.

PREGUNTAS

1. La composición del arrabio utilizado.
2. El hierro puro producido después del soplado.
3. Los metros cúbicos de aire requerido para el soplado completo.
4. El tiempo relativo ocupado por cada uno de los dos períodos.

SOLUCION

1.
Arrabio utilizado = Fe + Si + Mn + C

SiO_2 en escoria = 527 x 0,655 = 345,185 Kg.
Si oxidado = 345,185 x 28/60 = 161,1 Kg.

MnO en escoria = 527 x 0,135 = 71,145 Kg.
Mn oxidado = 71,145 x 55/71 = 55,11 Kg.

CO_2 en gas = 2760 x 0,06 = 165,60 m^3
C en este = 165,6 x 12/22,4 = 88,7 Kg.
CO en gas = 2760 x 0,181 = 499,56 Kg.
C en este = 499,56 x 12/22,4 = 267,6 Kg.
C total oxidado = 88,7 + 276,6 = 356,3 Kg.

Composición del arrabio (7-1)

Si = 100 x (161,1/10000) = 1,61%
Mn = 100 x (55,11/10000) = 0,55%
C = 100 x (356,3/10000) = 3,56%
Fe = 100 – 1,61 – 0,55 – 3,56 = 94,28%

2.
FeO en escoria = 527 x 0,21 = 110,67 Kg.

Fe oxidado = 110,67 x 56/72 = 86.1 Kg.

Fe puro producido = 9428 – 86 = 9342 Kg.

Fe puro producido = 9342 Kg. (7-2)

3.

N_2 en gas = N_2 del aire.

N_2 en gas = 2760 x 0,759 = 2094,84 m^3

Aire = 2094,84/0,79 = 2651,7 m^3

Aire requerido = 2651,7 m^3 (7-3)

4.

Elementos oxidados durante el 1° período = Si + Mn + algo de Fe.

O del SiO_2 = 345,2 – 161,1 = 184,1 Kg.
O del MnO = 71,15 – 55,11 = 16,04 Kg.
O del 1° período sin O del FeO = 184,1 + 16,04 = 200,14 Kg.

Elementos oxidados durante el 2° período = C (a CO) + C (a CO_2) + algo de Fe.

O del CO = 500 x ½ = 250 m^3 = 357 Kg.
O del CO_2 = 165,6 x 32/22,4 = 236,6 Kg.
O del 2° período sin O del FeO = 357 + 236,6 = 593,6 Kg.

Relación de tiempos = t_1/t_2 = 200,14/593,6 = 0,337/1

Relación de tiempos = t_1: t_2 = 0,337:1 (7-4)

EJERCICIO N°8 (7)

Un convertidor Bessemer sopla una carga de arrabio a acero rn 11 minutos. 1% del hierro en el arrabio es oxidado y escorificado. El peso de la escoria producida fue de 4200 libras consistiendo de 70%SiO_2, 20%MnO y 10%FeO. Además del Si y el Mn, el arrabio contiene 4,2%C. Tres cuartos del carbono se oxidan a CO y el resto a CO_2.

Asumir que el Fe se oxida a una rata uniforme.

PREGUNTAS

1. El peso del arrabio cargado.
2. El volumen de aire suministrado por minuto, en pies cúbicos.
3. El tiempo de duración de cada período.

SOLUCION

1.

Arrabio = Fe + Si + Mn + C

SiO_2 en escoria = 4200 x 0,7 = 2940 libras
Si del arrabio = 2940 x 28/60 = 1372

MnO en escoria = 4200 x 0,2 = 840 libras.
Mn del arrabio = 840 x 55/71 = 651

FeO en escoria = 4200 x 0,1 = 420 libras
Fe de este = 420 x 56/72 = 327
Fe del arrabio = 327/0,01 = 32700

95,8% del arrabio = 32700 + 651 + 1372 = 34723 libras ∴

Arrabio = 34723/0,958 = 36245 libras

Peso del arrabio cargado = 36245 libras (8-1)

2.

C del arrabio = 36245 x 0,042 = 1522,29 libras.

$C \rightarrow CO$ = 1522,29 x ¾ = 1141,72
$C \rightarrow CO_2$ = 1522,29 – 1141,72 = 380,57

O del CO = 1141,72 x 16/12 = 1522,29 lbs.
O del CO_2 = 380,57 x 32/12 = 1014,85 lbs.
O del SiO_2 = 2940 – 1372 = 1568 lbs.
O del MnO = 840 – 651 = 189 lbs.
O del FeO = 420 – 327 = 93 lbs.
O total = 1522 + 1015 + 1568 + 189 + 93 = 4387 lbs. = 49217 ft^3

Aire total = 49217/0,21 = 234367 ft^3

Aire = 234367/11 = 21306 ft^3/min.

Aire suministrado = 21306 ft^3/min. (8-2)

3.

O del primer período, sin el del FeO = 1568 + 189 = 1757 lbs.
t_1 sin FeO = 11 x 1757/4387 = 4,4 min.

O del segundo período, sen el del FeO = 1522 + 1015 = 2537 lbs.
t_2 sin FeO = 11 x 2537/4387 = 6,36 min.

$t_1 + t_2$ sin FeO = 4,4 + 6,36 = 10,76 min.

t_{FeO} = 11 x 93/4387 = 0,23 min.

t_1 total = 4,4 + 0,23 x 4,4/10,76 = 4,5 min

Duración del primer período = 4,5 min. (8-3)

t_2 total = 6,36 + 0,23 x 6,36/10,76 = 6,5 min.

Duración del segundo período = 6,5 min. (8-3)

EJERCICIO N°9 (7)

Un artículo menciona los siguientes análisis para la operación de un convertidor que trata un arrabio bajo en silicio y alto en manganeso, por el proceso Bessemer Sueco, el soplado fue suspendido para retener carbono y manganeso en el acero.

La carga es de 20 toneladas métricas, y el peso del acero fue 18400 kilogramos.

No se adiciona ningún fundente, pero hay corrosión del revestimiento del convertidor. El revestimiento no contiene manganeso.

ARRABIO (%)		ACERO EL FINAL DEL SOPLO (%)		ESCORIA (%)	
C	4,36	C	0,74	SiO_2	47,25
Mn	2,98	Mn	0,25	MnO	37,80
Si	0,95	Si	0,04	FeO	9,45
P	0,02			Al_2O_3	4,22
Fe	91,69			MgO	0,40
				CaO	0,88
				P_2O_5	---

PREGUNTAS

1. El porcentaje removido de cada una de las impurezas.
2. ¿Cuál hubiera sido el peso y la composición de la escoria si no hubiera ocurrido la corrosión del revestimiento?
3. La composición del revestimiento.

SOLUCION

1.

Arrabio = 20000 Kg.

C en arrabio = 20000 x 0,0436 = 872 Kg.
C en acero = 18400 x 0,0074 = 136,16 Kg.
C removido = 872 – 136,16 = 735,84 Kg.

Mn en arrabio = 20000 x 0,0298 = 596 Kg.
Mn en acero = 18400 x 0,0025 = 46 Kg.
Mn removido = 596 . 46 = 550 Kg.

Si en arrabio = 20000 x 0,0095 = 190 Kg.
Si en acero = 18400 x 0,0004 = 7,36 Kg.
Si removido = 190 – 7,36 = 182,64 Kg.

Impurezas removidas:

C = 735,84/872 = 0,844

C removido = 84,4% (9-1)

Mn = 550/596 = 0,923

Mn removido = 92,3% (9-1)

Si = 182,64/190 = 0,962

Si removido = 96,2% (9-1)

P removido = 0% (9-1)

2.

Escoria sin corrosión del revestimiento = SiO_2 + MnO + FeO

El P del arrabio pasa todo al acero.
P del arrabio = 20000 x 0,0002 = 4 Kg.

Fe del arrabio = 20000 x 0,9169 = 18338 Kg.
Fe en acero = 18400 – 136,16 – 46 – 7,26 – 4 = 18206,48 Kg.
Fe removido = 18338 – 18206,48 = 131,52 Kg.
FeO a escoria = 131,52 x 72/56 = 169,1 Kg.

Peso y composición de la escoria sin corrosión del revestimiento: (9-2)

SiO_2 = 182,64 x 68/28 = 391 Kg. = 30.8%
MnO = 550 x 71/55 = 710 Kg. = 55,9%
FeO = 169 Kg. = 13,3%
1270 Kg. = 100,0%

3.

MnO en escoria sin corrosión del revestimiento = MnO en escoria con corrosión del revestimiento.

Escoria con revestimiento corroído = SiO_2 + MnO + FeO + Al_2O_3 + MgO + CaO

Escoria con corrosión del revestimiento = 710/0,378 = 1878,3 Kg.

Revestimiento corroído = 1878,3 – 1270 = 608,3 Kg.

Distribución de la escoria con revestimiento corroído en sus componentes:

SiO_2 = 1878,3 x 0,4725 = 887,5 Kg.
MnO = " x 0,3780 = 710,0 Kg.
FeO = " x 0,0945 = 177,5 Kg.
Al_2O_3 = " x 0,0422 = 79,3 Kg.
MgO = " x 0,0040 = 7,5 Kg.
CaO = " x 0,0088 = 16,5 Kg.

Composición del revestimiento: (9-3)

SiO_2 = 887,5 – 391 = 496,5 Kg. = 81,62%
FeO = 177,5 – 169 = 8,5 Kg = 1,40%
Al_2O_3 = 79,3 Kg. = 13,04%
MgO = 7,5 Kg. = 1,23%
CaO = 16,5 Kg. = 2,71%
608,3 Kg. = 100,0%

EJERCICIO N°10 (7)

Un convertidor experimental Bessemer sopla un arrabio que contiene 93%Fe, 4%C, 2%Si y 1%Mn. La carga es de 22 toneladas. Un cuarto del carbono se quema hasta CO_2 y los tres cuartos restantes lo hacen a CO. Hierro en cantidad equivalente al 5% de la carga se oxida a una rata uniforme.

En el caso (a) el convertidor es soplado con aire ordinario, en el caso (b) con aire enriquecido con 30% de O_2.

La temperatura promedio del baño es de 1500°C.

PREGUNTAS

1. ¿Si en el caso (a) el soplado tarda 15 minutos, cuanto tardará en el caso (b), haciendo las máquinas de soplado el mismo número de revoluciones por minuto?

2. Calcular en ambos casos, el exceso de calor generado respecto del calor sacado por los gases, en cada período.

SOLUCION

1.

En igualdad de otras condiciones, el tiempo de soplado es inversamente proporcional al contenido de oxígeno que tenga el aire, es decir, cuanto más enriquecido esté este en oxígeno, menor deberá ser el tiempo de soplado.

Matemáticamente podemos establecer la siguiente relación:

$t_a : t_b = O_b : O_a$

Los subíndices "a" se refieren al tiempo y al contenido de oxígeno pata el caso (a), y los subíndices "b", a los del caso (b).

$t_a = 15$ min. $T_b = ?$

$O_a = 21\%$ $O_b = 30\%$

$t_b = t_a \times (O_a/O_b) = 15 \times (21/30)$ 10,5 min.

Tiempo de soplado con aire enriquecido = 10,5 min. (10-1)

2.

Caso (a):

Debemos calcular el tiempo que tarda cada período, procediendo de la siguiente manera:

Carga = 22000 Kg.

Distribución del arrabio:

Fe = 22000 x 0,93 = 20460 Kg.
C = 22000 x 0,04 = 880
Si = 22000 x 0,02 = 440
Mn = 22000 x 0,01 = 220

Cálculo del oxígeno necesario para oxidar los elementos:

O para Si = 440 x 32/28 = 502,9 Kg.
O para Mn = 220 x 16/55 = 64
Fe oxidado = 22000 x 0,05 = 1100
O para Fe = 1100 x 16/56 = 314,3

$C \rightarrow CO$ = 880 x ¾ = 660
$C \rightarrow CO_2$ = 880 x ¼ = 220

O del CO = 660 x 16/12 = 880
O del CO_2 = 220 x 32/12 = 586,7

O total = 502,9 + 64 + 314,3 + 880 + 586,7 = 2347,9 Kg.

O = 2347,9/15 = 156,5 Kg./min.

t_1 sin oxidación del Fe = (502,9 + 64)/156,5 = 3,62 min.
t_2 sin oxidación del Fe = (880 + 586,7)/156,5 = 9,37 min.
12,99 min.

t_{FeO} = 314,3/156,5 = 2,01 min.

t_1 total = 3,62 + 2,01 x (3,62/12,99) = 4,18 min.
t_2 total = 9,37 + 2,01 x (9,37/12,99) = 10,82 min.
15,00 min.

Calor generado en el primer período por oxidación de (ver datos en Tabla XLII):

Si = 440 x 7160 = 3'150.400 Kcal.
Mn = 220 x 1757 = 386.540
Fe = 1100 x (3,62/12,99) x 1151 = 352.832
Total calor de oxidación = 3'889.772 Kcal.

Escoria formada durante el primer período:

MnO = 220 + 64 = 284 Kg.
SiO_2 = 440 + 502,9 = 942,9
FeO = 1100 x (3,62/12,99) x (72/56) = 394,1

Asumiendo 70 Kcal. por kilogramo de MnO, el calor para la combinación entre el MnO y el SiO_2 y 120 Kcakl./Kg. de FeO para la combinación entre el FeO y el SiO_2, obtendremos el calor para la formación de la escoria en este período:

$MnO.SiO_2$ = 284 x 70 = 19880 Kcal.
$FeO.SiO_2$ = 394,1 x 120 = 47292 Kcal.
Calor de formación de la escoria = 67172 Kcal.

Calor total generado = 3'889.772 + 67172 = 3'956.944 Kcal.

Gas producido = N = [502,9 + 64 + 314,3 x (3,62/12,99)] x 76.8/23,2 = 2166,6 Kg.

Calor sacado por N = 2166,6 x (0,241 + $1,8x10^{-5}$ x 1500) x 1500 = 870973 Kcal.

Exceso de calor = 3'956.944 – 870.973 = 3'085.971 Kcal.
Exceso de calor (primer período), caso (a) = 3'085.971 Kcal. (10-2)

Segundo período (a):

Calor generado por la oxidación de:

$C \rightarrow CO$ = 660 x 2430 = 1'603.800 Kcal.
$C \rightarrow CO_2$ = 220 x 8100 = 1'782.000
Fe = 1100 x (9,37/12,99) x 1151 = 913.268
Calor total de oxidación = 4'299.068 Kcal.

Formación de escoria ($FeO.SiO_2$):

FeO = 1100 x (9,37/12,99) x (72/56) = 1020 Kg.

Calor de formación de escoria = 1020 x 120 = 122400 Kcal.

Total calor generado (2° período), caso (a) = 4'299.068 + 122400 = 4'421.468 Kcal.

O total de este período = 880 + 586,7 + 1100 x (9,37/12,99) x (16/56) = 1693,4 Kg.

Gases de este período:
N = 1693,4 x 76,8/23,2 = 5605,7 Kg.
CO = 660 + 880 = 1540 Kg.
CO_2 = 220 + 586,7 = 806,7 Kg.

Calor sacado por estos gases:
$CO = 1540 \times (0,242 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 =$ 621.390 Kcal.
$N = 5605,7 \times (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 =$ 2'253.491
$CO_2 = 806,7 \times (0,205 + 4,6 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 =$ 331.554
Calor total sacado por los gases = 3'206.435 Kcal.
Exceso de calor = 4'421.468 – 3'206.435 = 1'215.033 Kcal.

Exceso de calor (segundo período), caso (a) = 1'215.033 Kcal. (10-2)

Caso (b):

Aire enriquecido el 30% de O_2:

El cálculo y los resultados son similares a los del caso (a), hasta la determinación del N.

Primer período;

O_2 total = $[502,9 + 64 + 314,3 \times (3,62/12,99)] \times 22,4/32 = 458,14\ m^3$
$N_2 = 458,14 \times 70/30 = 1069\ m^3$

Calor sacado por $N_2 = 1069 \times (0,302 + 2,2\times10^{-5} \times 1500) \times 1500 =$ 537.173 Kcal.

Exceso de calor = 3'956.944 – 537.173 = 3'419.771 Kcal.

Exceso de calor (primer período), caso (b) = 3'419.771 Kcal. (10-2)

Segundo período:

O_2 total = $1693,4 \times 22,4/32 = 1185,38\ m^3$
$N_2 = 1185,38 \times 70/30 = 2766\ m^3$

$CO + N_2 = 1540 \times 22,4/28 + 2766 = 3998\ m^3$

Calor sacado en los gases de este período:

$CO + N_2 = 3998 \times (0.302 + 2,2\times10^{-5} \times 1500) \times 1500 =$ 2'008.995 Kcal.
CO_2 = 331.554
Total calor sacado por los gases = 2,340.549 Kcal.

Exceso de calor = 4'421.468 – 2'340.549 = 2'080.919 Kcal.

Exceso de calor (segundo período), caso (b) = 2'080.919 Kcal. (10-2)

EJERCICIO N°11 (7)

Un convertidor Bessemer, revestido con material básico, es cargado con 20 toneladas de arrabio de la siguiente composición:

Fe	91,2%	Si	1,7%
C	3,6	Mn	1,1
P	2,4		

El soplo oxida todo el C, Si, Mn y P; y también Fe en una cantidad equivalente al 5,6% del peso del arrabio. Asumir que el Fe es oxidado a una rata uniforme durante el soplo.

Se agrega suficiente CaO como para producir una escoria con 35%CaO. Dos tercios del carbono oxidado pasan a CO y un tercio lo hace a CO_2. Las máquinas de soplado proporcionan 580 metros cúbicos de aire por minuto.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire necesario para el soplado de la carga.

2. La duración de cada período del soplo.
3. El peso del CaO que debe adicionarse, y la composición de la escoria.

SOLUCION

1.

Cuando el arrabio es rico en P, su tratamiento se hace por el proceso Thomas, básico, o Bessemer básico; en el cual se adiciona al convertidor CaO como fundente (7), formándose una escoria fuertemente básica la cual extrae el P como fosfato cálcico. La oxidación del P tiene lugar en un *tercer período* después de la remoción del C, puesto que a temperaturas elevadas el P se oxida menos rápidamente que el C. En el proceso bessemer básico se puede asumir que algo del Fe (más o menos 1/3) se oxida en el segundo período y el resto en el tercero, o se asume que el Fe se oxida, como en el proceso ácido, a una rata uniforme durante el proceso.

Arrabio = 20000 Kg.

C en arrabio = 20000 x 0,036 = 720
$C \rightarrow CO$ = 720 x 2/3 = 480
$C \rightarrow CO_2$ = 720 – 480 = 240

$Fe \rightarrow FeO$ = 20000 x 0,056 = 1120

Si en arrabio = 20000 x 0,017 = 340
Mn en arrabio = 20000 x 0,011 = 220
P en arrabio = 20000 x 0,024 = 480

O del CO = 480 x 16/12 = 640 Kg.
O del CO_2 = 240 x 32/12 = 640
O del FeO = 1120 x 16/56 = 320
O del Si = 340 x 32/28 = 388,6
O del Mn = 220 x 16/55 = 64
O del P = 480 x 80/62 = 620
O total = 2672,6 Kg. = 1870,82 m^3

Aire = 1870,82/0,21 = 8909 m^3

Aire necesario para el soplado de la carga = 8909 m^3 (11-1)

2.

O_2 soplado = 580 x 0,21 = 121,8 m^3/min.
O soplado = 121,8 x 32/22,4 = 174 Kg./min.

Durante el primer período (tiempo = t_1), habrá oxidación de Si, Mn y algo de Fe.
Durante el segundo período (tiempo = t_2), habrá oxidación del C y algo de Fe.
Durante el tercer período (tiempo = t_3), habrá oxidación del P y algo de Fe.

t_1 sin oxidación de Fe = (388,6 + 64)/174 = 2,60 min.
t_2 sin oxidación de Fe = 640 x 2 / 174 = 7,36 min.
t_3 sin oxidación de Fe = 620 / 174 = 3,56 min.
13,52 min

Tiempo de oxidación del Fe ($t_{Fe} = t_{FeO}$) = 320/174 = 1,85 min.

Tiempo total de duración de cada período: (11-2)

t_1 = 2,60 + 1,85 x (2,60/13,52) = 2,96 min.
t_2 = 7,36 + 1,85 x (7,36/13,52) = 8,37 min.
t_3 = 3,56 + 1,85 x (3,56/13,52) = 4,04 min.
Tiempo total del soplado = 15,37 min.

Tiempo de duración de cada período: (11.1)

Primer período = 2,96 min.
Segundo período = 8,37 min.
Tercer período = 4,04 min.

3.
Escoria = $FeO + SiO_2 + MnO + P_2O_5 + CaO$

FeO = 1120 + 320 = 1440 Kg.
SiO_2 = 340 + 388,6 = 728,6
MnO = 220 + 64 = 284
P_2O_5 = 480 + 620 = 1100
Escoria sin CaO = 3552,6 Kg. = 65%

CaO = 3552,6 x (35/65) = 1913 Kg.

Peso del CaO a adicionar = 1913 Kg. (11-3)

Composición de la escoria: (11-3)

FeO	= 1440,0 Kg. =	26,35%
SiO_2	= 728,6 Kg. =	13,33%
MnO	= 284,0 Kg. =	5,20%
P_2O_5	= 1100,0 Kg. =	20,12%
CaO	= 1913,0 Kg. =	35,00%
Total escoria	= 5465,6 Kg. =	100,00%

EJERCICIO N°12 (7)

Un convertidor Bessemer fue cargado con 10000 kilogramos de arrabio y se le suministraron 203 metros cúbicos de soplo por minuto, por 18 minutos; produciéndose 1200 kilogramos de una escoria que contenía 15%SiO_2; 5,9%MnO; 47,3%P_2O_5; 24,0%FeO y 7,8%CaO. Un cuarto del carbono pasa a CO_2 y tres cuartos a CO.

Después del soplado, se adicionan 50 kilogramos de ferromanganeso como desoxidante y recarburizador (15%Fe, 80%Mn, 5%C). Asumir que la mitad del manganeso del ferromanganeso se pierde por oxidación.

PREGUNTAS

1. La composición del hierro utilizado.
2. El volumen y composición promedia de los gases producidos después del soplado completo.
3. El tiempo de cada período de soplado.
4. El porcentaje de acero producido al final del soplo.

SOLUCION

1.
Hierro (arrabio) utilizado = Fe + Mn + P + Si + C.

Escoria = 1200 Kg.

SiO_2 = 1200 x 0,15 = 180 Kg.:	Si = 180 x 28/60 = 84 Kg.
MnO = 1200 x 0,059 = 70,8 Kg.:	Mn = 70,8 x 55/71 = 54,8 Kg.
P_2O_5 = 1200 x 0,473 = 567,6 Kg.:	P = 567,6 x 62/142 = 247,6 Kg.

$FeO = 1200 \times 0,24 = 288$ Kg.: $Fe = 288 \times 56/72 = 224$ Kg.
$CaO = 1200 \times 0,078 = 93,6$ Kg.
Aire total $= 203 \times 18 = 3654$ m^3

O_2 total soplado $= 203 \times 0,21 \times 18 = 767,34$ m^3

Oxígeno en la escoria:

O_2 del $SiO_2 = 180 - 84 = 96$ Kg. $= 67,2$ m^3
O_2 del $MnO = 70,8 - 54,8 = 16$ Kg. $= 11,2$ m^3
O_2 del $P_2O_5 = 567,6 - 247,6 = 320$ Kg. $= 224,0$ m^3
O_2 del $FeO = 288 - 224 = 64$ Kg. $= \underline{44,8}$ m^3
Total O_2 de oxidación $= 347,2$ m^3

O_2 para CO y $CO_2 = 767,34 - 347,2 = 420,14$ m^3

Sea X = peso del C:

$C + ½ O_2 = CO$
$C + O_2 = CO_2$

O_2 del $CO = ¾ X \cdot (0,5 \times 22,4/12) = 0,70X$
O_2 del $CO_2 = ¼ X \cdot (22,4/12) = \underline{0,47X}$
O_2 total del C $= 1,17X$

$1,17X = 420,14$ ∴
X = peso del C $= 420,14/1,17 = 359$ Kg.

Fe en arrabio $= 10000 - 84 - 54,8 - 247,6 - 359 = 9254,6$ Kg.

Composición del hierro o arrabio: (12-1)

Fe =	9254,6 Kg. =	92,54%
Mn =	54,8 Kg. =	0,55%
P =	247,6 Kg. =	2,48%
Si =	84,0 Kg. =	0,84%
C =	359,0 Kg. =	3,59%
		100,00%

2.
Gas = $CO + CO_2 + N_2$

$C \rightarrow CO = 359 \times ¾ = 269$ Kg.
$C \rightarrow CO_2 = 359 - 269 = 90$ Kg.

Volumen y composición promedio del gas (12-2)

CO	$= 269 \times 22,4/12$	$= 502$ m^3	$= 14,1\%$
CO_2	$= 90 \times 22,4/12$	$= 168$ m^3	$= 4,7\%$
N_2	$= 3654 \times 0,79$	$= 2887$ m^3	$= 81,2\%$
Total gas		$= 3557$ m^3	$= 100,0\%$

3.
O_2 del 1° período sin O_2 del Fe $= 67,2 + 11,2 = 78,4$ m^3
O_2 del 2° " " " $= 1,17 \times 359 = 420.0$ m^3
O_2 del 3° " " " $=$ 224,0 m^3
O_2 del Fe $=$ $=$ 44,8 m^3

O_2 del soplado $= 203 \times 0,21 = 42,63$ m^3/min.

t_1 sin FeO = 78,4/42,63 = 1,84 min.
t_2 sin FeO = 420/42,63 = 9,85 min.
t_3 sin FeO = 224/42,63 = 5,25 min
16,94 min

t_{FeO} = 44,8/42,63 = 1,05 min.

Tiempo total de cada período: (12-3)

t_1 = 1,84 + 1,05 x (1,84/16,94) = 1,95 min.
t_2 = 9,85 + 1,05 x (9,85/16,94) = 10,46 min.
t_3 = 5,25 + 1,95 x (5,25/16,94) = 5,58 min.
Tiempo total = 17,99 min.

4.
Acero = Fe + Mn + C

Fe del arrabio = 10000 x 0,9254 = 9254 Kg.
Fe del FeO = 224 Kg.
Fe del Fe-Mn = 50 x 0,15 = 7,5 Kg.
Fe del acero = 9254 – 224 + 7,5 = 9037,5 Kg.

Mn del acero = 20 Kg.
C del acero = 50 x 0,05 = 2,5 Kg.

Peso del acero = 9037,5 + 20 + 2,5 = 9060 Kg.

Acero = 9060/10000 = 0,906

Acero = 90,6% del arrabio (12-4)

EJERCICIO Nº13 (7)

Un convertidor Bessemer básico es cargado con 20 toneladas métricas de arrabio, junto con CaO como fundente, y es soplado hasta que tiene 17 toneladas de Fe y 5720 kilogramos de escoria que contiene: 13%SiO_2, 5%MnO, 19%P_2O_5, 27%FeO y 36%CaO.

Asumir que el Fe se oxida a una rata uniforme durante el soplado. Dos tercios del carbono pasan a CO y un tercio a CO_2.

El tiempo total de soplado es de 28 minutos. Asumir que el calor de formación de la escoria es de 150 kilocalorías por kilogramo de SiO_2 durante el primer período y 700 kilocalorías por kilogramo de CaO durante el tercer período.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire requerido para el soplado.
2. El tiempo utilizado en cada periodo.
3. El calor generado por minuto durante cada período.

SOLUCION

1.
El aire es utilizado para la oxidación de las impurezas, por eso, el O de los elementos reducidos de la escoria + el O del CO y del CO_2; será el O del aire.

SiO_2 = 5720 x 0,13 = 743,6 Kg.: O = 743,6 x 32/60 = 396,6 Kg.
MnO = 5720 x 0,05 = 286,0 Kg.: O = 286,0 x 16/71 = 65,5 Kg.
P_2O_5 = 5720 x 0,19 = 1086,8 Kg.: O = 1086,8 x 80/142 = 612,3 Kg.
FeO = 5720 x 0,27 = 1544,4 Kg.: O = 1544,4 x 16/72 = 343,2 Kg.
Total O del aire en la escoria = 1416,4 Kg.

Arrabio oxidado:

Si = 743,6 – 396,6	=	347,0 Kg.
Mn = 286 – 64,5	=	221,5 Kg.
P = 1086,8 – 612,3	=	474,5 Kg.
Fe (FeO) = 1544,4 – 343,2	=	1201,2 Kg.
		2244,2 Kg.

Cálculo del C oxidado:

C del arrabio = 20000 – 17000 – 2244,2 = 755,8 Kg.

$C \rightarrow CO$ = 755,8 x 2/3 = 503,9 Kg.: O = 503,9 x 16/12 = 671,9 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 755,8 x 32/12 = 252,0 Kg.: O = 252,0 x 32/12 = 671,8 Kg.
Total O del C = 1343,7 Kg.

O total de oxidación = 1343,7 + 1416,6 = 2760,3 Kg. = 1932,21 m^3

Aire = 1932,21/0,21 = 9201 m^3

Aire requerido para el soplado = 9201 m^3 (13-1)

2.
El Fe se oxida a rata uniforme.
Durante el primer período (des – siliciación), hay oxidación del Si, Mn y algo de Fe.
Durante el segundo período (descarburación), hay oxidación del C y algo de Fe.
Durante el tercer período (desfosforación), hay oxidación del P y algo de Fe.

O (1°) sin O del Fe = 396,6 + 64,5	=	461,1 Kg.
O (2°) sin O del Fe = 671,9 + 671,8	=	1343,7 Kg.
O (3°) sin O del Fe	=	612,3 Kg.
		2417,1 Kg.
O del FeO	=	343,2 Kg.
		2760,3 Kg.

t_1 sin FeO = 28 x 461,1/2760,3 = 4,68 min.
t_2 sin FeO = 28 x 1343,7/2760,3 = 13,63 min.
t_3 sin FeO = 28 x 612,3/2760,3 = 6,21 min.
24,52 min.

t_{FeO} = 28 x 343,2/2760,3 = 3,48 min.

Tiempo total de cada período (13-2)

t_1 = 4,68 + 3,48 x (4,68/24,52)	=	5,34 min.
t_2 = 13,63 + 3,48 x (13,63/24,52)	=	15,56 min.
t_3 = 6,21 + 3,48 x (6,21/24,52)	=	7,09 min.
		27,99 min.

3.
Este calor se refiere al calor producido en c/u de los períodos, al oxidarse las impurezas correspondientes.

Calores de formación de óxidos (kilocalorías por kilogramo de metal):

SiO_2	7160	MnO	1757
FeO	1151	CO	2430
CO_2	8100	P_2O_5	5912

Primer período (kilocalorías):

Si = 347 x 7160 = 2'484.520
Mn = 221,5 x 1757 = 389.176
Fe = 1201,2 x (4,68/24,52) x 1151 = 263.886
3'137.582 Kcal.

Calor de formación de escoria = 150 x 743,6 = 111.540 Kcal.

Calor generado durante el 1° período = (3'137.582 + 111540)/5,34 = 608450 Kcal./min.
Calor generado durante el 1° período = 608450 Kcal./min. (13-3)

Segundo período (kilocalorías):

$C \rightarrow CO$ = 503,9 x 2430 = 1'224.477
$C \rightarrow CO_2$ = 252 x 8100 = 2'041.200
Fe = 1201,2 x (13,63/24,52) x 1151 = 768.539
4'034.216 Kcal.

Calor generado durante el 2° periodo = 4'034.216/15,56 = 259268 Kcal./min.
Calor generado durante el 2° período = 259268 Kcal./min. (13-3)

Tercer período (kilocalorías):

P = 474,5 x 5912 = 2'805.244
Fe = 1201,2 x (6,21/24,52) x 1151 = 350.156
3'155.400 Kcal.

CaO = 5270 x 0,36 = 2059,2 Kg.
Calor de formación de escoria = 2058,2 x 700 = 1'441.440 Kcal.

Calor generado durante el 3° período = (3'155.400 + 1'441.440)/7,09 = 648355 Kcal./min.
Calor generado durante el 3° período = 648355 Kcal./min. (13-3)

EJERCICIO N°14 (7)

El gas obtenido en un productor de gas, presenta el siguiente análisis:

CO_2	3,0%
CO	26,0%
CH_4	3,0%
H_2	14,0%
N_2	54,0%

Este gas es quemado en un horno de hogar abierto (open – hearth), utilizando para ello 10% de aire en exceso. En adición a este 10% de aire en exceso para la combustión, se filtra al horno a través de las puertas 50% de aire en exceso. Los gases productos de la combustión pasan a través de regeneradores para precalentar el gas de entrada y el aire, y luego a través de una caldera para pérdidas de calor salen a las chimeneas. En adición al carbono del gas, 0,054 kilogramos de carbono por metro cúbico de gas son quemados a CO por el oxígeno de la carga, y de CO a CO_2 por el oxígeno del aire que entra a través de las puertas del horno.

Se observan las siguientes temperaturas:

Aire a regeneradores, 35°C; aire precalentado, 1000°C
Gas a regeneradores, 600°C; gas precalentado, 1100°C
Temperatura máxima de la llama, 2100°C.
Productos de combustión salen del horno a 1550°C

Productos de combustión dejan los regeneradores a 680ºC
Productos de combustión dejan la caldera a 350ºC.

PREGUNTAS

1. El aire utilizado por metro cúbico de gas: (a) para combustión; (b) por filtración.
2. La composición de los productos de combustión, antes y después de mezclarse con el aire filtrado.
3. El calor total que entra al horno.
4. El calor en los gases del horno a la temperatura máxima de la llama.
5. El calor en los productos de combustión al salir del horno.
6. El calor en los productos de combustión al salir de los regeneradores.
7. El calor en los productos de combustión al salir de la caldera.
8. El porcentaje de distribución del calor de la operación.
9. La eficiencia de operación de los regeneradores (gas y aire combinados).
10. Los porcentajes de los productos de combustión que van a los regeneradores de aire y de gas.
11. El porcentaje del precalentamiento en el gas que es suministrado por los regeneradores y por el productor de gas.

SOLUCION

1.

La operación del horno de hogar abierto que describe el ejercicio, se puede visualizar en el esquema que aparece a continuación:

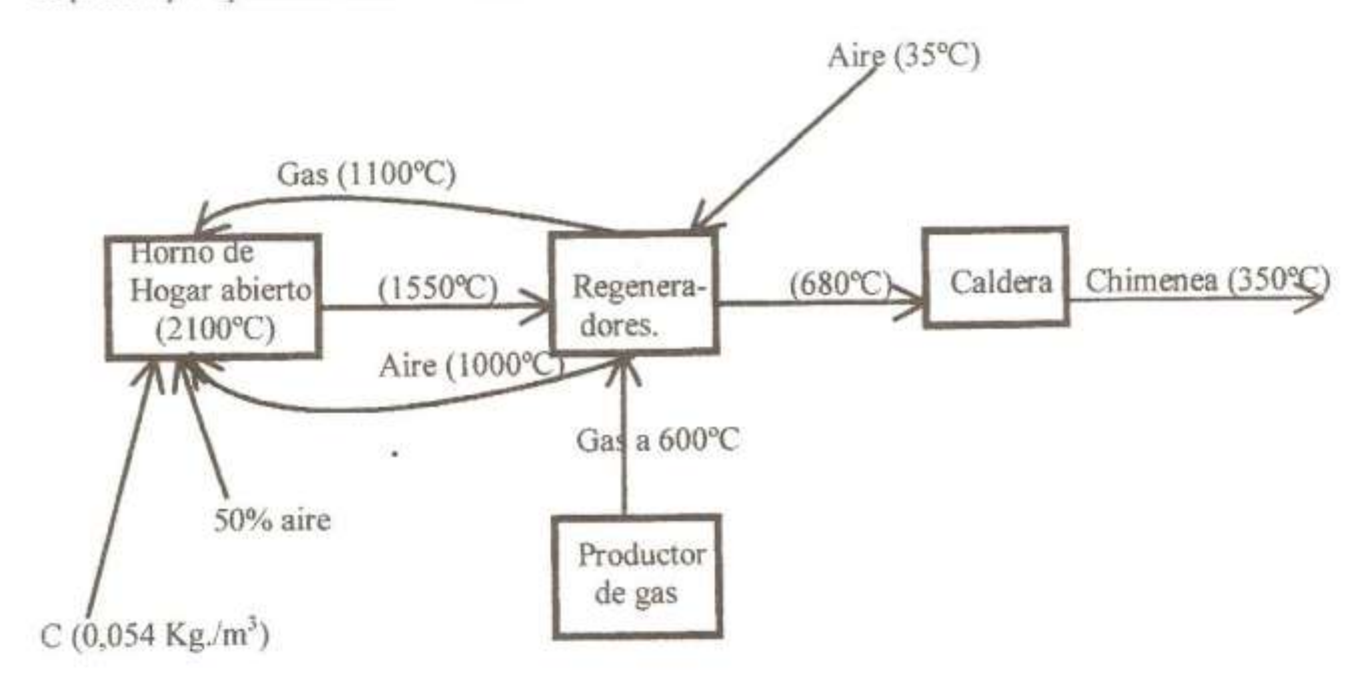


Figura # 1: Operación de un Horno de Hogar Abierto (open – hearth)

Reacciones de combustión del gas:

$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$:	$O_2 = 0{,}26 \times \frac{1}{2} = 0{,}13\ m^3$
$CH_4 + 2\ O_2 = CO_2 + 2H_2O$:	$O_2 = 2 \times 0{,}03 = 0{,}06\ m^3$
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$:	$O_2 = 0{,}14 \times \frac{1}{2} = \underline{0{,}07\ m^3}$
O_2 teórico	$= 0{,}26\ m^3$

Aire teórico = 0,26/0,21 = 1,24 m^3

(a): aire total (10% exceso) = 1,24 x 1,1 = 1,36 m^3

(a) Aire utilizado = 1,36 m^3/m^3 de gas (14-1)

(b) Aire total utilizado (50%exceso) = 1,24 x 0,5 = 0,62 m^3

(b) Aire utilizado con 50% exceso por filtración = 0,62 m^3 (14-1)

2.

P.C antes de mezclarse con aire filtrado = $N_2 + O_2 + CO_2 + H_2O$

Composición de estos P.C (14-2)

N_2 = 1,36 x 0,79 + 0,54 = 1,61 m^3 = 74,5%
O_2 = (1,36 – 1,24) x 0,21 = 0,03 m^3 = 1,4%
CO_2 = 0,03 + 0,26 + 0,03 = 0,32 m^3 = 14,8%
H_2O = 0,06 + 0,14 = 0,20 m^3 = 9,3%
2,16 m^3 = 100,0%

P.C después de mezclarse con el aire filtrado = $N_2 + O_2 + CO_2 + H_2O$

Total aire = 1,36 + 0,62 = 1,98 m^3
Aire total exceso = 1,98 – 1,24 = 0,74 m^3
O_2 de este = 0,74 x 0,21 = 0,1554 m^3

$2C + O_2 = 2CO$: CO = 0,054 x 22,4/12 = 0,1008 m^3
$CO + ½ O_2 = CO_2$: CO_2 = 0,1008 m^3
O_2 = 0,1008 x ½ = 0,0504 m^3

Composición de estos P.C (14-2)

N_2 = 1,98 x 0,79 + 0,54 = 2,10 m^3 = 74,5%
O_2 = 0,1554 – 0,0504 = 0,10 m^3 = 3,5%
CO_2 = 0,1008 + 0,32 = 0,42 m^3 = 14,9%
H_2O = 0,20 m^3 = 7,1%
2,82 m^2 = 100,0%

3.

Calor que entra al horno = potencia calorífica del gas + Precalentamiento del aire + precalentamiento del gas.

Potencia calorífica del gas:

CO = 0,26 x 3034 = 788,84 Kcal.
CH_4 = 0,03 x 8560 = 256,80
H_2 = 0,14 x 2582 = 361,48
Total = 1407,12 Kcal.

Precalentamientos a 1000°C:

Aire = 1,36 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 1000) x 1000 = 440,94 Kcal.

Gas:
CO_2 = 0,03 x (0,406 + 9 x 10^{-5} x 1000) x 1000 = 16,7
CO + N_2 = (0,26 + 0,54) x (0,302 + 2,2 x 10^{-5} x 1000) x 1000 = 287,1
CH_4 = 0,03 x (0,380 + 2,1 x 10^{-4} x 1000) x 1000 = 20,1
H_2 = 0,14 x (0,301 + 2 x 10^{-5} x 1000) x 1000 = 49,8
Total = 373,7 Kcal.

Calor total que entra el horno = 1407,12 + 440,94 + 373,7 = 2221 Kcal.

Calor total que entra al horno = 2221 Kcal (14-3)

4.
Temperatura máxima de la llama = 2100°C:

Contenido de calor de los productos de combustión a esta temperatura:

$N_2 + O_2$ = (1,61 + 0,03) x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 2100) x 2100 = 1199
CO_2 = 0,32 x (0,406 + 9 x 10^{-5} x 2100) x 2100 = 400
H_2O = 0,20 x (0,373 + 5 x 10^{-5} x 2100) x 2100 = 201
Total = 1800 Kcal.

Calor en los P.C a 2100°C = 1800 Kcal. (14-4)

5.
Calor en los productos de combustión que salen del horno a 1550°C:

$N_2 + O_2$ = (2,1 + 0,1) x (0,302 + 2,2 x 10^{-5} x 1550) x 1550 = 1146
CO_2 = 0,42 x (0,406 + 9 x 10^{-5} x 1550) x 1550 = 355
H_2O = 0,20 x (0,373 + 5 x 10^{-5} x 1550) x 1550 = 140
Total = 1641 Kcal.

Calor en los P.C que salen del horno = 1641 Kcal (14-5)

6.
Calor en los productos de combustión que salen de los regeneradores a 680°C:

N_2 + CO = (2,1 + 0,1) x (0.302 + 2,2 x 10^{-5} x 680) x 680 = 475
CO_2 = 0,42 x (0,406 + 9 x 10^{-5} x 680) x 680 = 133
H_2O = 0,20 x (0,373 + 5 x 10^{-5} x 680) x 680 = 55
Total = 663 Kcal.

Calor en los P.C que salen de los regeneradores = 663 Kcal (14-6)

7.
Calor en los productos de combustión que salen de la caldera a 350°C:
Para los volúmenes y calores específicos de los casos anteriores, si sustituimos las temperaturas por 350°C, se obtienen los resultados que se dan abajo:

$N_2 + O_2$ = 239
CO_2 = 64
H_2O = 27
Total = 330 Kcal.

Calor en los P.C que salen de la caldera a 350°C = 330 Kcal. (14-7)

8.
Calor que entra al horno = 2221 Kcal.
Calor de la combustión = 1800 Kcal.
Pérdidas por combustión = 2221 – 1800 = 421 Kcal.
% perdido en la combustión = 100 x (421/2221) = 19

Pérdidas por combustión = 19% (14-8)

9.
Eficiencia en regeneradores = calor utilizado/calor que entra.

Calor utilizado = calor en precalentamientos de aire + gas

Calor que entra = calor en P.C a 1550°C + calor que lleva el aire a 35°C + calor que lleva el gas a 600°C.

Contenido de calor del aire a 35°C
= 1,36 x (0,302 + 2,2 x 10^{-5} x 35) x 35 = 14 Kcal.

Contenido de calor del gas a 600°C:

CO_2 = 8,0
CO = 49,0
CH_4 = 9,0
H_2 = 26,0
N_2 = 102,0
Total = 194,0 Kcal.

Calor por precalentamiento del aire = 441 Kcal.
Calor en gas precalentado = 373,7 Kcal.
Calor utilizado en llevar el gas a 1100°C = 373,3 – 194 = 179,7 Kcal.

Calor utilizado = 441 + 179,7 = 620,7 Kcal.

Calor que entra a regeneradores = 1641 + 194 + 14 = 1849 Kcal.

Eficiencia = 620,7/1849 = 0,336

Eficiencia de los regeneradores = 33,6% (14-9)

10.
Calor con que entra el aire a los regeneradores = 14 Kcal.
Calor con que sale el aire de los regeneradores = 441 Kcal.
Calor aportado por los regeneradores al aire = 441 – 14 = 427 Kcal.

Calor con que entra el gas a los regeneradores = 194 Kcal.
Calor con que sale el gas de los regeneradores = 374 Kcal.
Calor aportado por los regeneradores al gas = 374 – 194 = 180 Kcal.

Total calor efectivo = 427 + 180 = 607 Kcal.

Productos de combustión para regenerador en aire = 2,82 x (427/607) = 1,984 m^3
Productos de combustión para regeneradores en aire = 1,984/2,82 = 0,704

P.C. para regeneradores en aire = 70,4% (14-10)

Productos de combustión para regeneradores en gas = 2,82 x (180/607) = 0,836 m^3
Productos de combustión para regeneradores en gas = 0,836/2,82 = 0,296

P.C. para regeneradores en gas = 29,6% (14-10)

11.
Precalentamiento del gas aportado por regeneradores = 180/374 = 0,4813

Precalentamiento del gas aportado pos regeneradores = 48,13% (14-11)

Precalentamiento del gas aportado por el productor de gas = 194/374 = 0,5187

Precalentamiento del gas portado por el productor de gas = 51,78% (14-11)

EJERCICIO N°15 (7)

Un horno para aceros de hogar abierto (básico), es cargado con 20 toneladas de chatarra y 20 toneladas de arrabio. Durante el calentamiento se adicionan 3 toneladas de mineral de hierro y suficiente $CaCO_3$ como para producir una escoria final con 40%CaO.

Para la desoxidación se utilizan 400 kilogramos de ferromanganeso y 180 kilogramos de ferrosilicio.

Se producen 39800 kilogramos de acero final cuyo análisis es: 0,3%C; 0,2%Mn; 0,1%Si; 0,06%P y 99,34%Fe.

El análisis de los materiales utilizados fue el siguiente:

	Chatarra de acero (%)	Arrabio (%)	Ferromanganeso (%)	Ferrosilisio (%)	Mineral de hierro (%)
Fe	99,00	92,6	12	50	80%Fe_2O_3
C	0,50	4,0	6		
Mn	0,30	1,5	80		4%MnO
Si	0,12	0,8	2	50	16%SiO_2
P	0,08	1,1			

El carbono oxidado pasa a CO.

Asumir que la mitad del Fe en la escoria (como FeO) proviene del mineral y la otra mitad de la oxidación es producida por los gases del horno.

PREGUNTAS

1. El peso y la composición de la escoria.
2. El peso del $CaCO_3$ necesitado.
3. La proporción de la oxidación en el horno que es realizada por el mineral de hierro y por las gases del horno.

SOLUCION

1.

Escoria = FeO + P_2O_5 + SiO_2 + MnO + CaO

Mn en acero final = 39800 x 0,002 = 79,6 Kg.
Mn en chatarra = 20000 x 0,003 = 60
Mn en arrabio = 20000 x 0,015 = 300
Mn en Fe-Mn = 400 x 0,80 = 320
MnO en mineral = 3000 x 0,04 = 120

Mn cargado, sin Mn en el mineral = 60 + 300 + 320 = 680 Kg.
Extrayendo en Mn que queda en el acero nos queda el Mn a escorificar:

Mn a oxidar = 680 – 79,6 = 600,4 Kg.
MnO a escoria = 120 + 600,4 x (71/55) = 895 Kg.

Si en acero final = 39800 x 0,001 = 39,8 Kg.
Si en chatarra = 20000 x 0,0012 = 24
Si en arrabio = 20000 x 0,008 = 160
Si en Fe – Mn = 400 x 0,02 = 8
Si en Fe – Si = 180 x 0,50 = 90
Si total cargado sin el del mineral = 282 Kg.

Si a ser oxidado = 282 – 39,8 = 242,2 Kg.
SiO_2 a escoria = 242,2 + 3000 x 0,16 = 999 Kg.

P en acero final = 39800 x 0,0006 = 23,88 Kg.
P en chatarra = 20000 x 0,0008 = 16
P en arrabio = 20000 x 0,011 = 220
P cargado = 236 Kg.
P → P_2O_5 = 236 – 23,88 = 212,12 Kg.
P_2O_5 a escoria = 212,12 x (142/62) = 485,8 Kg.

Fe en acero final = 39800 x 0,9934 = 39537,32 Kg.
Fe en chatarra = 20000 x 0,99 = 19800
Fe en arrabio = 20000 x 0,926 = 18520
Fe en Fe – Mn = 400 x 0,12 = 48
Fe en Fe – Si = 180 x 0,50 = 90
Fe_2O_3 en mineral = 2400 x (112/160) = 1680 Kg.
Fe → FeO = 19800 + 18520 + 48 + 90 + 1680 – 39537,32 = 600,68 Kg.
FeO a escoria = 600,68 x (72/56) = 772,3 Kg.

60% escoria = FeO + P_2O_5 + SiO_2 + MnO = 772,3 + 485,8 + 999 + 895 = 3152,1 Kg.

CaO = 3152,1 x (40/60) = 2101,4 Kg.

Peso y composición de la escoria (15-1)

FeO	=	772,3	=	14,7%
P_2O_5	=	485,8	=	9,3%
SiO_2	=	999,0	=	19,0%
MnO	=	895,0	=	17,0%
CaO	=	2101,4	=	40,0%
Escoria total = 5253,5 Kg.				100,0%

2.
$CaCO_3$ = 2101,4 x 100/56 = 3752,5 Kg.
Peso del $CaCO_3$ = 3752,5 Kg. (15-2)

3.
Fe en escoria = 600,68 Kg.
De este, 600,68 x ½ = 300,34 Kg. proviene del Fe_2O_3
FeO resultante = 300,34 x 72/56 = 386,15 Kg.

$Fe_2O_3 = 2FeO + ½ O_2$

O oxidante = 386,15 x 16/144 = 42,9 Kg.

FeO formado por gases = 386,15 Kg.
O de este = 386,15 x 16/72 = 85,8 Kg.

Total O oxidante = 49,2 + 85,8 = 128,7 Kg.

Oxidación realizada por el mineral de Fe = 49,2/128,7 = 0,333
Oxidación realizada por el mineral de Fe = 33,3% (15-3)

Oxidación realizada por los gases = 85,8/128,7 = 0,667
Oxidación realizada por los gases = 66,7% (15-3)

EJERCICIO Nº16 (7)

Un horno de hogar abierto procesa la carga que aparece en la siguiente página.

Se producen 75 toneladas de un acero que contiene 0,1%C; 0,2%Mn; 0,02%P y 0,1%FeO en solución.

La escoria producida contiene:

SiO_2	15,0%	FeO	17,0%
CaO	52,0	MgO	5,5
MnO	9,5	P_2O_5	1,0

CARGA DEL HORNO

Arrabio líquido (45 toneladas) (%)		Chatarra (30 toneladas) (%)		Mineral (8 toneladas) (%)		Fundente (8 toneladas) (%)	
C	4,30	C	0,10	Fe_2O_3	80,00	$CaCO_3$	99
Si	1,00	Si	0,05	SiO_2	5,00	SiO_2	1
Mn	1,70	Mn	0,50	Mn	0,10		
P	0,11	P	0,03	P	0,07		
Fe	92,89	Fe	99,32				

El horno se encuentra recubierto con dolomita calcinada. Después de colar en la cuchara se adicionan al acero 1000 libras de ferromanganeso (80%Mn, 15%Fe, 5%C).

PREGUNTAS

1. El peso de la escoria producida.
2. Los pesos del CaO y el MgO que pasan a la escoria, provenientes del revestimiento del horno.
3. Los pesos de Fe, Mn y P inexplicables o extraños (probablemente, parcialmente debidos a volatilización y parcialmente debidos a al redondeo de cifras correspondientes al establecimiento de los pesos y los análisis).
4. La composición del acero final.

SOLUCION

1.

Peso del acero = 75 x 2000 = 150000 libras:

C = 150000 x 0,001 = 150
Mn = x 0,002 = 300
P = x 0,0002 = 30
FeO = x 0,001 = 150
Fe = x 0,9958 = 149370

Distribución de la carga:

Arrabio = 45 x 2000 = 90000 libras

Si = 90000 x 0,01 = 900
C = x 0,043 = 3870
Mn = x 0,017 = 1530
P = x 0,0011 = 99
Fe = x 0,9289 = 83601

Chatarra = 30 x 2000 = 60000 libras:

C = 60000 x 0,001 = 60
Si = x 0,0005 = 30
Mn = x 0,005 = 300
P = x 0,0003 = 18
Fe = x 0,9932 = 59592

Mineral = 8 x 2000 = 16000 libras

Fe_2O_3 = 16000 x 0,80 = 12800
SiO_2 = x 0,05 = 800
Mn = x 0,001 = 16
P = x 0,0007 = 11,2

Fundente = 8 x 2000 = 16000 libras:

$CaCO_3$ = 16000 x 0,99 = 15840
SiO_2 = x 0,01 = 160

El acero no contiene Si, de modo que todo el que aparece en la carga es oxidado a SiO_2 y pasa a la escoria.

Si en arrabio + chatarra = 900 + 30 = 930 lbs.
SiO_2 formado = 930 x 60/28 = 1993 lbs.
SiO_2 a escoria = 1993 + 800 + 160 = 2953 lbs.

Escoria = 2953/0,15 = 19687 lbs.

Peso de la escoria producida = 19687 libras (16-1)

2.
CaO en escoria = 19687 x 0,52 = 10237 lbs.
CaO del $CaCO_3$ = 15840 x 56/100 = 8870,4 lbs.

CaO del revestimiento = 10237 – 8870,4 = 1366,6 lbs.

CaO proveniente del revestimiento = 1366,6 libras (16-2)

Ningún componente de la carga contiene MgO ni nada que lo pueda generar, de modo que el que aparezca en la escoria debe provenir del revestimiento.

MgO (escoria) = MgO (revestimiento) = 19687 x 0,055 = 1083

MgO proveniente del revestimiento = 1083 libras (16-2)

3.
FeO en escoria = 19687 x 0,17 = 3347 lbs.
Fe de este = 3347 x 56/72 = 2603
Fe en Fe_2O_3 = 12800 x 112/160 = 8960
Fe cargado = 8960 + 83601 + 59592 = 152153 lbs.
Fe del FeO del acero = 150 x 56/72 = 117
Fe teórico en escoria = 152153 – 149370 (acero) – 117 = 2666

Fe inexplicable = 2666 – 2600 = 66

Fe inexplicable = 66 libras (16-3)

MnO en escoria = 19687 x 0,095 = 1870,3 lbs.
Mn de este = 1870,3 x 55/71 = 1449
Mn en acero = 300
Mn cargado = 1530 + 300 + 16 = 1846
Mn teórico en escoria = 1846 – 300 (acero) = 1546

Mn inexplicable = 1546 – 1499 = 97

Mn inexplicable = 97 libras (16-3)

P cargado = 99 + 18 + 11,2 = 128,2 libras
P_2O_5 en escoria = 19687 x 0,01 = 197
P de este = 197 x 62/142 = 86
P teórico en escoria = 128,2 – 30 (acero) = 98,2

P inexplicable = 98,2 – 86 = 12,2

P inexplicable = 12,2 libras (16-3)

4.
Acero final = Fe + C + Mn + P

Fe total = Fe (acero inicial) + Fe (Fe – Mn) = 149370 + 1000 x 0,15 = 149520 lbs.

Debido a que en el acero inicial hay 150 libras de FeO disuelto, al adicionar la ferroaleación, ocurre la siguiente reacción:

$$FeO + Mn = Fe + MnO$$

Mn oxidado = 150 x 55/72 = 114,6 libras.
Fe reducido = 150 x 56/72 = 116,7
Fe en acero final = 149520 + 116,7 = 149636,7
Mn en acero final = 300 + 1000 x 0,8 – 114,6 = 985,4
C en acero final = 150 + 1000 x 0,05 = 200

Composición del acero final (16-4)

Fe	=	149636,7 lbs.	=	99,20%
C	=	200,0	=	0,13%
Mn	=	985,4	=	0,65%
P	=	30,0	=	0,02%
Acero final	=	150852,1 lbs.		100,00%

EJERCICIO N°17 (7)

Un horno de hogar abierto (básico) para aceros, procesa una carga de 80 toneladas de arrabio y chatarra que tiene en promedio la siguiente composición:

C	2,7%
Mn	0,7
Si	1,0
P	0,8
Fe	94,8

El metal final (listo para recarburación) debe contener un quinto del carbono original y un séptimo del manganeso original, pero nada de silicio ni fósforo.

La oxidación de las impurezas está acompañada parcialmente por los gases del horno y parcialmente por la adición de un mineral que contiene 85%Fe_2O_3 y15%SiO_2; Asumir la división de la oxidación del modo siguiente:

Si, todo por gases... a SiO_2
Mn, la mitad por gases y la mitad por mineral.......................... a MnO
C, un quinto por gases , cuatro quintos por mineral.................. a CO
P, todo por el mineral... a P_2O_5

La escoria deberá contener FeO equivalente al 2% del hierro en el arrabio y la chatarra cargados. El FeO está oxidado la mitad por los gases y la otra mitad es reducido del Fe_2O_3. Se carga suficiente $CaCO_3$ como para producir una escoria con 40%CaO.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral necesario.
2. El peso de la escoria producida.
3. El peso del $CaCO_3$ utilizado.
4. El peso del baño final.

SOLUCION

1.

En el mineral, el agente oxidante es el Fe_2O_3.

Carga = 80 x 2000 = 160000 libras.

C = 160000 x 0,027 = 4320
C oxidado = 4320 x 4/5 = 3456
C oxidado por el mineral = 3456 x 4/5 = 2764,8
O de este = 2764,8 x 16/12 = 3686,4

Mn = 160000 x 0,007 = 1120
Mn oxidado = 1120 x 6/7 = 960
Mn oxidado por el mineral = 960 x ½ = 480
O de este = 480 x 16/55 = 139,6

P cargado = 160000 x 0,008 = 1280
O de este = 1280 x 80/62 = 1651,6

Fe (arrabio + chatarra) = 160000 x 0,948 = 151680
Fe → FeO = 151680 x 0,02 = 3033,6
Fe → FeO del mineral = 3033,6 x ½ = 1516,8
O de este = 1516,8 x 16/56 = 433,3

Sea X = peso del mineral:

O del Fe_2O_3 = 0,85X x 48/160 = 0,255X
O aportado por el Fe_2O_3 = 3686,4 + 139,6 + 1651,6 + 433,3 = 5911

5911 = 0,255X ∴
X = 5911/0,255 = 23180,4

Peso del mineral = 23180,4 libras (17-1)

2.

Escoria = SiO_2 + MnO + P_2O_5 + FeO + CaO

SiO_2 en mineral = 23180 x 0,15 = 3477,1 libras.
Si en arrabio + chatarra = 160000 x 0,01 = 1600
SiO_2 formado = 1600 x 60/28 = 3429
SiO_2 a escoria = 3477,1 + 3429 = 6906,1 libras.

MnO = 960 x 71/55 = 1239,3 libras

P_2O_5 = 1280 x 142/62 = 2932 libras

FeO total = 3033,6 x 72/56 = 3900,3 libras.

60% de escoria = SiO_2 + MnO + P_2O_5 + FeO = 6906,1 + 1239,3 + 2932 + 3900.3 = 14977,7

Escoria = 14977,7/0,6 = 24963

Peso de la escoria = 24963 libras. (17-2)

3.

CaO = 24963 x 0,4 = 9989,4 libras

$CaCO_3$ = 9989,4 x 100/56 = 17838,1

Peso de $CaCO_3$ utilizado = 17838,1 libras. (17-3)

4.
Baño final = C + Mn + Fe.

C en baño final = 4320 – 3456 = 864

Mn en baño final = 1120 x 1/7 = 160

Fe_2O_3 = 23180,4 x 0,85 = 19703,3
Fe en Fe_2O_3 = 19703,3 x 112/160 = 13792,3
Fe de este que pasa al acero = 13792,3 – 1516,8 = 12275,5
Fe en baño final = 151680 + 12275,5 – 1516,8 (gases) = 162438,7

Baño final = 162438,7 + 160 + 864 = 163462,7

Baño final = 163462,7 libras (17-4)

EJERCICIO N°18 (7)

Un horno básico para aceros, de hogar abierto, reciba 40 toneladas de arrabio y chatarra con una composición promedia como la siguiente:

Fe	93,7%
C	3,0
Mn	0,8
Si	1,1
P	1,4

Se adiciona también suficiente mineral para completar tres cuartos de la oxidación de las impurezas (C a CO, Mn a MnO, Si a SiO_2, P a P_2O_5) y suficiente cal como para producir una escoria con 40%CaO. El mineral contiene 82%Fe_2O_3, 14%SiO_2 y 4%Al_2O_3. La cal es CaO puro. 2% del Fe total cargado (incluyendo el Fe en el mineral), se pierde en la escoria como FeO.

El horno utiliza 50000 metros cúbicos de gas obtenido en un productor de gas, con el siguiente análisis:

CO	25%
H_2	12
CO_2	8
H_2O	4
N_2	51

Este es quemado con un 20% de aire en exceso. Los productos de combustión completan la oxidación de las impurezas, se oxida el Fe que entra a la escoria y se cambia el CO a CO_2.

Los gases del horno pasan a los regeneradores a 1500°C, y estos precalientan tanto al aire como al gas combustible a 700°C.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral utilizado, en kilogramos.
2. El peso de la escoria producida.
3. El peso del Fe producido.
4. El volumen de los gases que salen del horno.
5. La eficiencia térmica de los regeneradores.

SOLUCION

1.
C en arrabio y chatarra = 40000 x 0,03 = 1200 Kg.
O de este → CO = 1200 x 16/12 = 1600 Kg.

Mn en arrabio y chatarra = 40000 x 0,008 = 320 Kg.
$Mn \rightarrow MnO$: O = 320 x 16/55 = 93,1 Kg.

Si en arrabio y chatarra = 40000 x 0,011 = 440 Kg.
$Si \rightarrow SiO_2$: O = 440 x 32/28 = 502,8 Kg.

P en arrabio y chatarra = 40000 x 0,014 = 560 Kg.
$P \rightarrow P_2O_5$: O = 560 x 80/62 = 722,6 Kg.

O total para oxidar impurezas = 1600 + 93,1 + 502,8 + 722,6 = 2918,5 Kg.
¾ de este provienen del Fe_2O_3.
O proveniente del Fe_2O_3 = 2918,5 x ¾ = 2188,9 Kg.

Sea X = peso del mineral:

O del Fe_2O_3 = 0,82X x 48/160 = 0,246X

Fe del Fe_2O_3 = 0,82X – 0,246X = 0,574X
De este Fe, 2% pasa a la escoria = 0,574X x 0,02 = 0,01148X
O de este Fe = 0,01148 x 16/56 = 0,00328X
O total del Fe_2O_3 = 2188,9 + 0,00328X = 0,246X ∴

2188,9 = 0,246 – 0,00328 = 0,242X ∴
X = 2188,9/0,242 = 9045

Peso del mineral = 2045 Kg. (18-1)

2.
Escoria = $MnO + SiO_2 + P_2O_5 + Al_2O_3 + FeO + CaO$.

MnO = 320 x 71/55 = 413,1 Kg.

SiO_2 formado por oxidación = 440 + 502,8 = 942,8 Kg.
SiO_2 del mineral = 9045 x 0,14 = 1266,3 Kg.
SiO_2 a escoria = 942,8 + 1266,3 = 2209,1 Kg.

P_2O_5 a escoria = 722,6 + 560 = 1282,6 Kg.

Al_2O_3 a escoria = 9045 x 0,04 = 361,8 Kg.

Fe del Fe_2O_3 = 9045 x 0,574 = 5191,8 Kg.
Fe en arrabio y chatarra = 40000 x 0,937 = 37480 Kg.
Total Fe cargado = 5191,8 + 37480 = 42671,8 Kg.
$Fe \rightarrow FeO$ = 42671,8 x 0,02 = 853,4 Kg.
FeO = 853,4 x 72/56 = 1097,2 Kg.

60% de escoria = $FeO + MnO + SiO_2 + Al_2O_3 + P_2O_5$
= 1097,2 + 413,1 + 2209,1 + 1282,6 + 361,8 = 5363,8 Kg.

Escoria = 5363,8/0,60 = 8939,7

Peso de la escoria = 8940 Kg. (18-2)

3.
Fe = 42671,8 x 0,98 = 41818,4

Fe producido = 41818,4 Kg. (18-3)

4.

Gases del horno = $N_2 + O_2 + H_2O + CO_2$

Gas combustible = 50000 m^3

CO = 50000 x 0,25 = 12500 m^3
H_2 = 50000 x 0,12 = 6000
CO_2 = 50000 x 0,08 = 4000
H_2O = 50000 x 0,04 = 2000
N_2 = 50000 x 0,51 = 25500

$CO + ½ O_2 = CO_2$: CO_2 = 12500
O_2 = 12500 x ½ = 6250

$H_2 + ½ O_2 = H_2O$: H_2O = 6000
O_2 = 6000 x ½ = 3000

O_2 teórico = 6250 + 3000 = 9250
O_2 total = 9250 x 1,2 = 11100
O_2 exceso = 11100 – 9250 = 1850

N_2 del aire = 11100 x 79/21 = 41757

Impurezas oxidadas por el aire:

Mn = 329 x ¼ = 80 Kg.:
O = 80 x 16/55 = 23,3 Kg.
O del Si = 502,8 x ¼ = 125,7Kg.
O del P = 722,6 x ¼ = 180,6 Kg.
O del C = 1600 x ¼ = 400 Kg.
O del FeO = 1097,2 – 853,4 = 243,8 Kg.

O de oxidación de impurezas = 23,3 + 125,7 + 180,6 + 400 + 143,8 = 973,4 Kg. = 681,4 m^3

CO del C = 1600 + 1200 = 1200 x 28/12 = 2800 Kg. = 2240 m^3
$CO + ½ O_2 = CO_2$: CO_2 = 2240
O_2 = 2240 x ½ = 1120
O_2 libre (a gas) = 1850 – 1120 – 681,4 = 48,6 m^3

CO_2 total = 12500 + 4000 + 2240 = 18740 m^3

H_2O total = 2000 + 6000 = 8000 m^3

N_2 total = 25500 + 41757 = 67257 m^3

Volumen y composición del gas que sale del horno (18-4)

N_2	=	67257,0 m^3	=	71,51%
O_2	=	48,6	=	0,05%
H_2O	=	8000,0	=	8,51%
CO_2	=	18740,0	=	19,93%
Total gas	=	94045,6 m^3	=	100,00%

5.

El movimiento térmico de los gases se puede observar en el esquema de la figura que se muestra en la página siguiente:

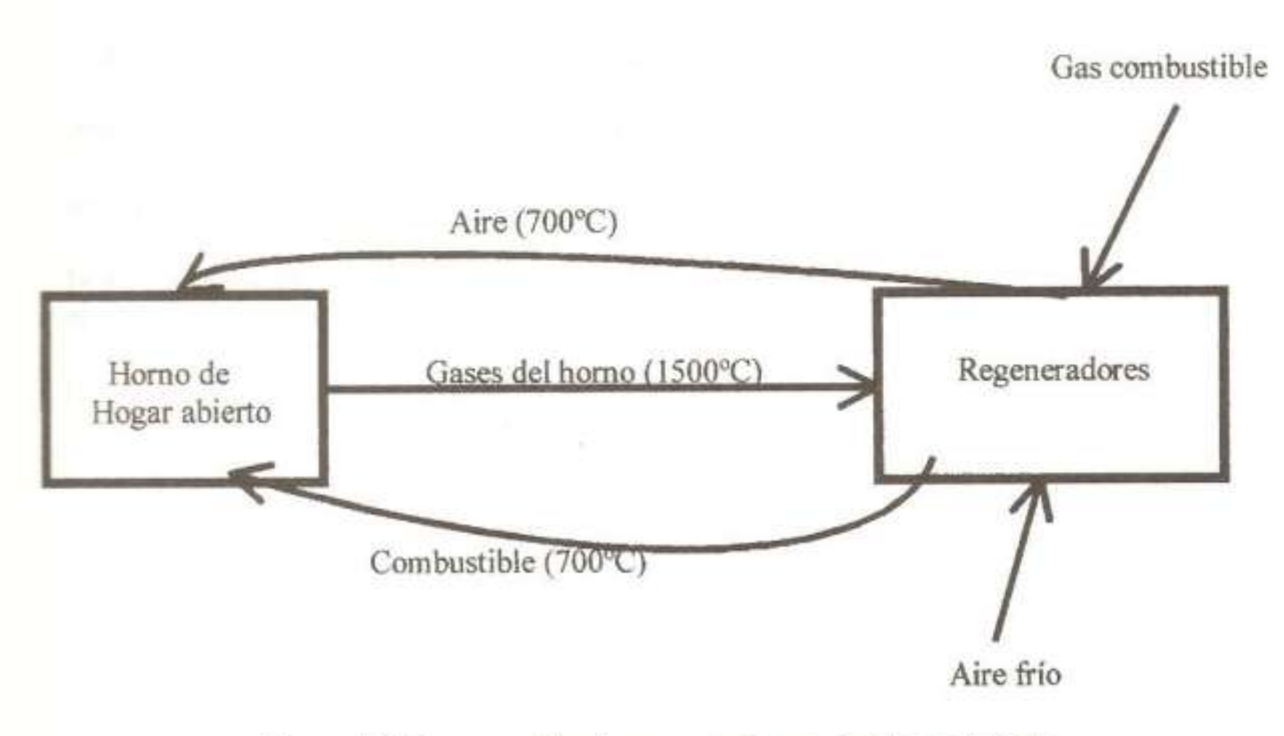


Figura # 2: Esquema térmico para un horno de Hogar Abierto.

Eficiencia térmica = 100 x (Calor utilizado/calor aportado)

Contenido de calor de los gases del horno al entrar a los regeneradores a 1500°C:

CO_2 = 18740 x (0,406 + 9,0x10^{-5} x 1500) x 1500 = 15'207.510 Kcal.
H_2O = 8000 x (0,373 + 5,0x10^{-5} x 1500) x 1500 = 5'376.000 "
$N_2 + O_2$ = 67305,6 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 1500) x 1500 = 33'821.064 "
54'404.574 Kcal.

Precalentamiento del aire a 700°C:

Aire = 41757/0,21 = 52857 m^3

57857 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 700) x 700 = 11'743.768 kcal.

Precalentamiento del gas combustible a 700°C:

H_2 = 6000 x (0,301 + 2,0x10^{-5} x 700) x 700 = 1'323.000 Kcal.
$CO + N_2$ = 38000 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 700) x 700 = 8'442.840 "
CO_2 = 4000 x (0,406 + 9,0x10^{-5} x 700) x 700 = 1'313.200 "
H_2O = 2000 x (0,373 + 5,0x10^{-5} x 700) x 700 = 571.200 "
11'650.240 Kcal.

Calor utilizado en precalentamientos = 11'650.240 + 11'743.768 = 23'394.008 Kcal.

Eficiencia de los regeneradores = 23'394.008/54'404.574 = 0,43

Eficiencia de los regeneradores = 43,0% (18-5)

EJERCICIO N°19 (7)

Un horno de hogar abierto es cargado primero con 40 toneladas de chatarra que contiene 0,5%C; 0,1%Si; 0,3%Mn; 0,05%P. Dos horas después, se agregan 50 toneladas de arrabio fundido, el cual contiene 4,0%C; 1,0%Si; 1,5%Mn; 0,26%P.

Justo antes de que el arrabio sea adicionado, se han oxidado por los gases del horno dos tercios del Si y el Mn de la chatarra; además, un octavo del Fe en la chatarra se ha transformado a FeO.

Junto con el arrabio se adicionan, mineral que contiene 75%Fe_2O_3, 13%SiO_2, 12%MnO y suficiente $CaCO_3$ como para producir una escoria con 42%CaO.

El FeO formado a partir de la chatarra reacciona ahora con las impurezas del arrabio, suministrando oxígeno para oxidarlas en parte, y se autoreduce a Fe.

A partir del mineral se forma suficiente FeO como para producir una escoria final con 20%FeO; el resto del Fe_2O_3 del mineral es reducido a Fe.

El baño, justo antes de la colada, contendrá 25% del Mn contenido en la chatarra y el arrabio como Mn residual. Contendrá también C equivalente al 0,5% del peso total del arrabio y la chatarra cargados.

Se utiliza suficiente mineral para oxidar todo el balance de las impurezas (asumir que el $C \rightarrow CO$), después del permitido para la acción del FeO reseñado arriba.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral adicionado.
2. El peso del $CaCO_3$ utilizado.
3. La composición de la escoria.
4. la composición del acero (antes de la recarburación).

SOLUCION

1.

Para este cálculo, comparamos el oxígeno aportado por el gas y el aportado por el mineral para la oxidación de las impurezas, el cual a su vez proviene del Fe_2O_3.

Carga conocida:

Chatarra = 40 x 1000 = 40000 Kilogramos.

C = 40000 x 0,005 = 200
Si = 40000 x 0,001 = 40
Mn = 40000 x 0,003 = 120
P = 40000 x 0,0005 = 20
Fe = 40000 x 0,9905 = 39620

Arrabio = 50 x 1000 = 50000 kilogramos.

C = 50000 x 0,04 = 2000
Si = 50000 x 0,01 = 500
Mn = 50000 x 0,015 = 750
P = 50000 x 0,0026 = 130
Fe = 50000 x 0,9324 = 46620

C cargado = 200 + 2000 = 2200 Kg.
C en baño = (40000 + 50000) x 0,005 = 450
C oxidado = 2200 – 450 = 1750

Mn cargado (arrabio + chatarra) = 120 + 750 = 870 Kg.
Mn oxidado = 870 x 0,75 = 652,5

Si oxidado = 40 + 500 = 540 Kg.

P oxidado = 20 + 130 = 150 Kg.

O del C = 1750 x 16/12 = 2333,3 Kg.
O del Mn = 625,5 x 16/55 = 189,8 Kg.
2/3 Mn en chatarra = 120 x 2/3 = 80
O de este = 80 x 16/55 = 23,3
O del Mn, proveniente del mineral = 189,8 – 23,3 = 166,5 Kg.

O del Si = 540 x 32/28 = 617,1 Kg.
2/3 Si en chatarra = 40 x 2/3 = 26,7 Kg.
O de este = 26,7 x 32/28 = 30,5 Kg.
O del Si, proveniente del mineral = 617,1 – 30,5 = 586,6 Kg.

O del P = 150 x 80/62 = 193,5 Kg.

O total del mineral (sin el del FeO) = 2333,3 + 166,5 + 586,6 + 193,5 = 3279,9 ≅ 3280 Kg.

Fe en chatarra → FeO al principio = 39620 x 1/8 = 4952,5 Kg.
O de este = 4952,5 x 16/56 = 1415 Kg.

Sea X = peso del mineral.

SiO_2 formado = 540 + 617,1 = 1157,1 Kg.
MnO formado = 652,5 + 189,8 = 842,3 Kg.
P_2O_5 formado = 150 + 189,8 = 343,5 Kg.
2342,9 Kg.

SiO_2 y MnO del mineral = 0,13X + 0,12X = 0,25X

Escoria = CaO + SiO_2 + FeO + MnO + P_2O_5
CaO + FeO = 42 + 20 = 62% de la escoria.
P_2O_5 + MnO + SiO_2 = 100 – 62 = 38% de la escoria.

2342,9 + 0,25X = 38% de la escoria.

FeO = 20% de la escoria.
FeO en escoria = (2342,9 + 0,25X) x 20/38 = 1233,1 + 0,1316X
O de este = (1233,1 + 0,1316X) x 16/72 = 274,0 + 0,0292X

O del FeO para reducir impurezas = 1415 – 274 – 0,0292X = 1141 – 0,0292X

O suministrado por el mineral = 3280 – (1141 – 0,0292X) = 2139 + 0,0292X

Del análisis del mineral obtenemos:

O del Fe_2O_3 = 0,75X x 48/160 = 0,225X

2139 + 0,0292X = 0,225X ∴

X = 10924,4 Kg.

Peso del mineral adicionado = 10924,4 Kg. (19-1)

2.
2342,9 + 0,25X = 38% de la escoria
Escoria = (2342,9 + 0,25 x 10924,4)/0,38 = 13352,6 Kg.

CaO = 13352,6 x 0,42 = 5608,1 Kg.

$CaCO_3$ = 5608,1 x 100/56 = 10014,5 Kg.

$CaCO_3$ utilizado = 10014,5 Kg. (19-2)

3.
Escoria = SiO_2 + MnO + FeO + CaO + P_2O_5

Composición de la escoria. (19-3)

SiO_2 = 1157,1 + 0,13 x 10924,4	= 2577,3 Kg. = 19,3%
MnO = 652,5 + 189,8 + 0,12 x 10924,4	= 2153,2 Kg. = 16,1%
FeO = 1233,1 + 0,1316 x 10924,4	= 2670,7 Kg. = 20,0%
CaO	= 5608,1 Kg. = 42,0%
P_2O_5	= 343,5 Kg. = 2,6%
	13352,8 Kg. 100,0%

4.

Acero = Fe + C + Mn.

Fe cargado = 39620 + 46620 + 10924,4 x 0,75 x 112/160 = 91975,3 Kg.
Fe en escoria = 2670,7 x 56/72 = 2077,2 Kg.
Fe en arrabio = 91975,3 – 2077,2 = 89898,1 Kg.

Mn en acero = (120 + 750) x 0,25 = 217,5 Kg.

C en acero = (40000 + 50000) x 0,005 = 450Kg.

Composición del acero antes de la recarburación: (19-4)

Fe	=	89898,1 Kg.	=	99,26%
Mn	=	217,5 Kg.	=	0,24%
C	=	450,0 Kg.	=	0,50%
		90565,6 Kg.		100,00%

EJERCICIO N°20 (7)

Un horno eléctrico, mientras se prepara para la colada, utiliza 1000 Kw. y de estos requiere 400 Kw. para mantener la carga de 10 toneladas de acero a la temperatura de colada.

El calor requerido para elevar 1 kilogramo de acero al punto de fusión es 250 kilocalorías, para fundir el acero, 50 kilocalorías. Asumir una pérdida de calor uniforme en el horno en el transcurso de la operación.

El punto de fusión del acero es 1500°C.

El calor específico del acero fundido es 0,20.

El tiempo total de la operación es de 8 horas. Durante el tiempo siguiente a la fusión, mientras la carga está siendo desoxidada, liberada de escorias y colada; la temperatura se mantiene constante e igual a la temperatura de colada, 1700°C.

PREGUNTAS

1. El tiempo requerido para calentar la carga a la temperatura de fusión.
2. El tiempo requerido para fundir la carga.
3. El tiempo requerido para sobre calentar la carga.
4. La eficiencia electrotérmica de la operación global.
5. El tiempo total requerido, y la eficiencia, si se utilizan 1500 Kw, mientras se calienta al punto de fusión.

SOLUCION

1.

Calor requerido para elevar la carga al punto de fusión = 10000 x 250 = 2'500.000 Kcal.
Para ponerse a punto para la colada, requiere 1000 Kw.
Para mantener la carga a la temperatura de colada se requieren 400 Kw.
Para llegar al punto de fusión se requieren 1000 – 400 = 600 KW.
1 Kw-hr $\rightarrow$ 860 Kcal.

X → 2'500.000 Kcal.

Kw-hr = 2'500.000 / 860 = 2907

t = 2907 Kw-hr / 600 Kw = 4,85 hr.

Tiempo requerido para llevar la carga al punto de fusión = 4,85 horas (20-1)

2.

Calor requerido para fundir el acero = 10000 x 50 = 500000 Kcal.

Dado que las pérdidas son uniformes en toda la operación, podemos utilizar la siguiente regla de tres:

2'500.000 Kcal. → 4,85 hr.
500.000 → X

X = 4,85 x (500000/2'500000) = 0,97

Tiempo requerido para fundir la carga = 0,97 horas (20-2)

3.

El sobrecalentamiento consiste en elevar el acero fundido, desde 1500°C hasta 1700°C, es decir, una elevación de temperatura de 200°C.

Calor debido al sobrecalentamientp = 10000 x 0,2 x 200 = 400000 Kcal..

Con una regla de tres parecida a la anterior:

X = 4,85 x (400000/2'500.000) = 0,776 ≅ 0,78

Tiempo para sobrecalentar la carga = 0,78 horas. (20-3)

4.

El contenido de calor necesario para mantener el acero a 1700°C, será
400000 Kcal. = 10000 x 0,2 x 200

Calor total de la operación = 2'500.000 + 500000 + 400000 + 400000 = 3'800.000 Kcal.

Eficiencia = 3'800.000 / 1000 x 8 x 860 = 0,552

Eficiencia electrotérmica de la operación = 55,2% (20-4)

5.

Si se utilizan 1500 KW. hasta que se llega al punto de fusión, el tiempo utilizado para esta etapa seria:

t = 2'500.000 / [(1500 – 400) x 860] = 2,64 hr.

Tiempo total = 8 – 4,85 + 2,64 = 5,79 hr

Tiempo total de la operación = 5,79 horas (20-5)

Dado que para el calentamiento por encima del punto de fisión y para el mantenimiento a la temperatura de colada, en ambos casos, los tiempos y la energía consumida siguen siendo los mismos, para el cálculo de la eficiencia, promediamos la energía así:

(1100 + 600)/2 + 400 = (1500 + 1000/2 = 1250 Kw.

Eficiencia = 3'800.000 / 1250 x 5,79 x 860 = 0,611

Eficiencia = 61,1% (20-5)

EJERCICIO N°21 (7)

Un horno eléctrico utiliza 20000 amperios y 75 voltios, con un factor de potencia de 0,80. Se calientan 6000 kilogramos de acero desde 0°C hasta su punto de fusión de 1500°C en 2 horas. En el instante en que se termina la fusión, cada kilogramo de acero contiene 290 kilocalorías.

El calor latente de fusión es 51 kilocalorías.

El calor específico del acero fundido es 0,21.

Después de la fusión, el acero es sobrecalentado a 1680°C para la colada.

Asumir que la rata de calor perdido durante cualquier período, es proporcional a la temperatura media durante dicho período.

PREGUNTAS

1. La eficiencia térmica promedio del horno, durante el período de calentamiento.
2. El tiempo requerido para fundir el acero, y la eficiencia de este período.
3. El tiempo requerido para el sobrecalentamiento, y la eficiencia durante este período.

SOLUCION

1.

Vamos a utilizar las siguientes expresiones:

$$W = E \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot Cos\phi = 3 \cdot e \cdot i \cdot Cos\phi \qquad (2)$$

$$Q = 0{,}00024 I^2 \cdot R t = 0{,}00024 V \cdot I \cdot t \qquad (3)$$

Para 1 hora: Q = 0,00024 x I^2 x R x t = 0,864VTt.

Donde:

W = potencia eléctrica (W)
E = tensión entre fase y fase = V = voltios.
I = corriente de línea = amperios.
Cos ϕ = factor de potencia
e = tensión entre fase y neutro (sistema estrella)
i = corriente de fase.
Q = calor generado en el circuito eléctrico, Kcal.
R = resistencia (Ohm)
t = tiempo

Contenido de calor del acero calentado = 6000 x 290 = 1'740.000 Kcal.

Calor aportado = 0,00024 x 75 x 20000 x 2 x 3600 x 0,8 = 2'073.600 Kcal.

Eficiencia = 1'740.000/2'073.600 = 0,839

Eficiencia durante el calentamiento = 84% (21-1)

2.

A 1500°C, antes de fundir el acero, cada kilogramo de este contiene 290 – 51 = 239 Kcal.

Debido a que las pérdidas son proporcionales a la temperatura en cada período, podemos establecer la siguiente regla de tres:

2 horas → 239 Kcal./Kg.
X → 51

X = tiempo de fusión = 2 x (51/239)) = 0,43

Tiempo requerido para fundir el acero = 0,43 horas. (21-2)

Calor de fusión = 6000 x 75 = 306000 Kcal.

Calor aportado durante la fusión (ecuación #3) =
= 0,00024 x 75 x 20000 x 0,43 x 3600 x 0,8 = 445824 Kcal.

Eficiencia = 306000/445824 = 0,686

Eficiencia durante el período de fusión = 68,6% (21-2)

3.

Calor requerido por el sobrecalentamiento = 6000 x (1680 – 1500) x 0,21 = 226800 Kcal.

Tiempo para sobrecalentamiento = 2 x226800 / 239 x 6000 = 0,32

Tiempo requerido para sobrecalentar el acero = 0,32 horas. (21-3)

Calor aportado durante el sobrecalentamiento =
= $2{,}4\times10^{-4}$ x 75 x 20000 x 0,32 x 3600 x 0,8 = 331776 Kcal.

Eficiencia = 226800 / 331776 = 0,683

Eficiencia durante el período de sobrecalentamiento = 68,3% (21-3)

EJERCICIO N°22 (7)

Cierto carbón bituminoso tiene la siguiente composición:

C	78%
H	5
O	8
R	8
H_2O	1

Este carbón es quemado en un horno con el objeto de calentar lingotes de acero dúctil para forja. Asumir que solamente se utiliza en la combustión, la cantidad de aire teórico. Los productos de combustión salen del horno a 1000°C. Por cada 1000 kilogramos de carbón quemado, se calientan 10000 kilogramos de lingotes a 1000°C, en 1 hora.

PREGUNTAS

1. El porcentaje de la potencia calorífica del carbón, perdido en las chimeneas.
2. El porcentaje de la potencia calorífica del carbón, utilizado en el calentamiento de los lingotes.
3. ¿Cuanta potencia eléctrica será requerida para calentar los mismos lingotes, asumiendo el mismo calor por radiación y conducción del horno, por hora, que cuando se quemó el carbón?
4. ¿Cuánta potencia eléctrica sería requerida solo para mantener los lingotes a 1000°C, después de que ellos has sido calentados a esa temperatura?

SOLUCION

1.

Reacciones de combustión:

$C + O_2 = CO_2$: O_2 = 780 x 22,4/12 = 1456 m^3
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$: O_2 = 50 x 22,4/4 = 280 m^3
1736 m^3

O_2 teórico = 1736 – 80 x 22,4/32 = 1680 m^3
Aire teórico = 1680/0,21 = 8000 m^3

Productos de combustión = $N_2 + CO_2 + H_2O$

$N_2 = 8000 \times 0{,}79 = 6320\ m^3$
$CO_2 = 1456\ m^3$
$H_2O = 280 \times 2 + 10 \times 22{,}4/18 = 572\ m^3$
$8348\ m^3$

P.C.B del carbón = 8100C + 34000 x (H – O/8) + 2200S – 586 x (9H + W)
P.C.B del carbón = 8100 x 780 + 34000 x (50 – 80/8) + 0 – 586 x (9 x 10 + 10)
= 7'408.440 Kcal.

Calor sacado por los gases productos de la combustión:
$N_2 = 6320 \times (0{,}302 + 2{,}2\times10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 2'047.680$ Kcal.
$H_2O = 572 \times (0{,}373 + 5{,}0\times10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 241.956$ Kcal.
$CO_2 = 1456 \times (0{,}406 + 9{,}0\times10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 722.178$ Kcal.
3'011.812 Kcal.

Calor perdido en gases = 3'011.812/7'408.440 = 0,406
Pérdidas en las chimeneas = 40,6% (22-1)

2.
Consideremos al lingote como Fe puro y apliquemos los calores específicos que aparecen en la Tabla XIV del Apéndice:

Calentamiento del lingote:

De 0° a 600°C = 10000 x (0,104 + 0,000064 x 600) x 600 = 654.400 Kcal.
De 600° a 760°C = 10000 x [0,18 + 0,0003 x (760 – 600)] x 160 = 364.800 Kcal.
De 760° a 910°C = 10000 x [0,32 + 0,00053 x (910 – 760)] x 150 = 360.750 Kcal.
De 910° a 1000°C = 10000 x [0,16 + 0,00001 x (1000 – 910)] x 90 = 144.810 Kcal.
1'724.760 Kcal.

Calor para calentamiento del lingote = 1'724.760/7'408.440 = 0,233
Calor para calentamiento del lingote = 23,3% (22-2)

3.
Calor neto = 7'408.440 – 3'011.812 = 4'396.628 Kcal.

1 Kw-hr. = 860 Kcal.

Potencia eléctrica = 4'396.628 / 860 = 5112 Kw.
Potencia eléctrica = 5112 Kw (22-3)

4.
Calorías netas que se necesitan para que los lingotes se mantengan a 1000°C =
= 4'396.628 – 1'724.760 = 2'671.868 Kcal.
Con estas calorías, el lingote se mantendrá a 1000°C

Potencia eléctrica = 2'671.868 / 860 = 3107 Kw.
Potencia eléctrica = 3107 Kw. (22-4)

EJERCICIO N°23 (7)

En el primer (refinación) período, un horno eléctrico básico para aceros, trata 10 toneladas de una carga que contiene la siguiente composición promedia:

C	2,0%	P	0,8%
Mn	0,8	S	0,2
Si	1,0	Fe	95,2

El acero final (listo para el super-refunado) debe contener un cuarto del carbono original, un quinto del silicio original, la mitad del manganeso original; pero nada de azufre ni fósforo. La oxidación de las impurezas es complementada por la adición de mineral de hierro que contiene 85%Fe_2O_3 y 15%SiO_2.

La escoria producida contiene hierro igual al 2% del total cargado, todo el cual proviene de la reducción del Fe_2O_3 del mineral a FeO, y contiene también 40%CaO. El manganeso pasa a la escoria como MnO, el silicio como SiO_2, el fósforo como P_2O_5, el azufre como CaS y el carbono se oxida a CO.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral utilizado.
2. El peso de la escoria producida.
3. El peso de la cal utilizada.
4. El peso del acero producido.

SOLUCION

1.

Carga inicial = 10 x 1000 = 10000 kilogramos:

C = 10000 x 0,02 = 200
Mn = 10000 x 0,008 = 80
Si (inicial) = 10000 x 0,01 = 100
P = 10000 x 0,008 = 80
S = 10000 x 0,002 = 10
Fe (inicial) = 10000 x 0,952 = 9520

C → acero = 200 x ¼ = 50 Kg.
C oxidado = 200 – 50 = 150 Kg.

Mn → acero = 80 x ½ = 40 Kg.
Mn → escoria = 80 – 40 = 40 Kg.

Si → acero = 100 x 1/5 = 20 Kg.
Si (original) → SiO_2 = 100 – 20 = 80 Kg.

O del C = 150 x 16/12 = 200 Kg.

MnO = 40 x 71/55 = 51,6 Kg.
O del Mn = 51,6 – 40 = 11,6 Kg.

SiO_2 inicial = 80 x 60/28 = 171,4 Kg.
O de este = 171,4 – 80 = 91,4 Kg.

P_2O_5 = 80 x 142/62 = 183,2 Kg.
O de este = 183,2 – 80 = 103,2 Kg.

CaS = 20 x 72/32 = 45 Kg.

Sea X = peso del mineral:

Fe en Fe_2O_3 = 0,85X x 112/160 = 0,595X
Fe total = 0,595X + 9520

$Fe \rightarrow FeO = (0,595X + 9520) \times 0,02 = 0,0119X + 190,4$
$FeO = (0,0119X + 190,4) \times 72/56 = 0,0153X + 244,8$
O total del $Fe_2O_3 = 0,85X - 0,595X = 0,255X$
O del $FeO = 0,0153X + 244.8 - 0,0119X - 190,4 = 0,0034X + 54,4$
O aportado por el $Fe_2O_3 = 0,255X - 0,0034X - 54,4 = 0,2516X - 54,4$
O para impurezas = 200 + 11,6 + 91,4 + 103,2 = 406,2 Kg.

$FeS + CaO = FeO + CaS$

$CaO = 45 \times 56/72 = 35$ Kg.
O de este = $35 \times 16/56 = 10$ Kg.

O para impurezas – O aportado por el CaO = 406,2 – 10 = 396,2 Kg.

$396,2 = 0,2516X - 54,4 \therefore$

X = 1791 Kg.

Peso del mineral = 1791 Kg. (23-1)

2.
Escoria = $FeO + SiO_2 + MnO + P_2O_5 + CaS + CaO$

$FeO = 0,0153 \times 1791 + 244,8 = 272,20$ Kg.
$SiO_2 = 0,15 \times 1791 + 171,43 = 440,48$ Kg.

Escoria sin CaO = 60% = 272,20 + 440,48 + 51,64 + 183,33 + 45 = 992,25 Kg.

Peso de la escoria = 992,25/0,6 = 1653,75 Kg.

Peso de la escoria = 1653,75 Kg. (23-2)

3.
CaO en escoria = $1653,75 \times 0,4 = 661,5$ Kg.
$CaO \rightarrow CaS = 10 + 25 = 35$ Kg.
Total CaO = 661,5 + 35 = 696,5 Kg.

Peso de la cal utilizada = 696,5 Kg. (23-3)

4.
Acero = Fe + Mn + Si + C

Fe total cargado = $9520 + 0,595 \times 1791 = 10585,6$ Kg.
$Fe \rightarrow$ acero = $10585,6 \times 0,98 = 10373,9$ Kg.

Acero = 10373,9 + 40 + 20 + 50 = 10484 Kg.

Peso del acero producido = 10484 Kg. (23-4)

EJERCICIO N°24 (7)

Un horno eléctrico es cargado con 4 toneladas de chatarra de acero y 4 toneladas de arrabio.

Durante el calentamiento se adicionan 600 kilogramos de mineral de hierro, y suficiente $CaCO_3$ como para producir una escoria con 40%CaO.

Como desoxidantes se utilizan 80 kilogramos de ferromanganeso y 36 kilogramos de ferrosilicio.

Se producen, listos para el super refinado, 7960 kilogramos de acero que contiene: 0,3%C; 0,2%Mn; 0,1%Si; 0,02%P y 99,38%Fe.

El análisis de los materiales utilizados fue el siguiente:

	Chatarra de acero (%)	Arrabio (%)	Ferro-Manganeso (%)	Ferro-Silicio (%)	Mineral de hierro (%)	
Fe	99,00	92,0	12	50	Fe_2O_3	80
C	0,50	4,0	6			
Mn	0,30	0,8	80		MnO	4
Si	0,12	1,2	2	50	SiO_2	16
P	0,08	2,0				

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas del horno.
2. La composición de la escoria.

SOLUCION

1.

El balance de cargas del horno aparece a continuación, y está basado en los cálculos que aparecen más abajo.

BALANCE DE CARGAS (24-1)

CARGA (Kg.)		PRODUCTOS (Kg.) Acero		Escoria		Gases	
Chatarra = 4000							
Fe	3960	Fe	3960	---	---	---	---
C	20	C	20	---	---	---	---
Mn	12	Mn	12	---	---	---	---
Si	4,8	---	---	Si	4,8	---	---
P	3,2	P	1,592	P	1,608	---	---
Arrabio = 4000							
Fe	3680	Fe	3680	---	---	---	---
C	160	C	3,88	---	---	C	156,12
Mn	32	Mn	3,92	Mn	28,08	---	---
Si	48	Si	7,96	Si	40,04	---	---
P	80	---	---	P	80	---	---
Ferromanganeso = 80							
Fe	9,6	Fe	9,6	---	---	---	---
C	4,8	---	---	---	---	C	4,8
Mn	64,0	---	---	Mn	64	---	---
Si	1,6	---	---	Si	1,6	---	---
Ferrosilicio = 36							
Fe	18	Fe	18	---	---	---	---
Si	18	---	---	Si	18	---	---
Mineral de Fe = 600							
Fe_2O_3	480	Fe	243,048	FeO	119,51	O	117,44
MnO	24	---	---	MnO	24	---	---
SiO_2	96	---	---	SiO_2	96	---	---
$CaCO_3$ = 813,55							
CaO	455.59	---	---	CaO	455,59	---	---
CO_2	357,96	---	---	---	---	CO_2	357,96
Aire = 1305,36							
N	1002,57	---	---	---	---	N	1002,57
O	302,86	---	---	---	---	O	302,86
Totales	**10834,91**		**7960**		**933,228**		**1941,75**

Distribución de la carga (Kg.):

Acero = 7960

C = 7960 x 0,003 = 23,88
Mn = 7960 x 0,002 = 15,92
Si = 7960 x 0,001 = 7,96
P = 7960 x 0,0002 = 1,592
Fe = 7960 x 0,9938 = 7910,648

Chatarra = 4000

Fe = 4000 x 0,99 = 3960
C = 4000 x 0,005 = 20
Mn = 4000 x 0,003 = 12
Si = 4000 x 0,0012 = 4,8
P = 4000 x 0,0008 = 3,2

Arrabio = 4000

Fe = 4000 x 0,92 = 3680
C = 4000 x 0,04 = 160
Mn = 4000 x 0,008 = 32
Si = 4000 x 0,012 = 48
P = 4000 x 0,02 = 80

Ferromanganeso = 80

Fe = 80 x 0,12 = 9,6
C = 80 x 0,06 = 4,8
Mn = 80 x 0,80 = 64
Si = 80 x 0,02 = 1,6

Ferrosilicio = 36

Fe = 36 x 0,5 = 18
Si = 36 x 0,5 = 18

Mineral de Fe = 600

Fe_2O_3 = 600 x 0,8 = 480
MnO = 600 x 0,04 = 24
SiO_2 = 600 x 0,16 = 96

Destino de los componentes de la carga:

C $\rightarrow$ CO = 20 + 160 + 4,8 – 23,88 = 160,92 Kg.
O de este = 160,92 x 16/12 = 214,56

Mn $\rightarrow$ MnO = 12 + 32 + 64 – 15,92 = 92,08 Kg.
O de este = 92,08 x 16/55 = 26,79
MnO formado = 92,08 + 26,79 = 118,87
MnO a escoria = 118,87 + 24 = 142,87

Si $\rightarrow$ SiO_2 = 4,8 + 48 + 1,6 + 18 – 7,96 = 64,44 Kg.
O para este = 64,44 x 32/28 = 73,65
SiO_2 formado = 73,56 + 64,44 = 138,09
SiO_2 a escoria = 138,09 + 96 = 234,09

P $\rightarrow$ P_2O_5 = 3,2 + 80 – 1,592 = 81,608 Kg.

O para este = 81,608 x 80/62 = 105,301
P_2O_5 a escoria = 105,301 + 81,608 + 186,91

Fe (chatarra + arrabio + Fe-Mn + Fe-Si) = 3960 + 3680 + 9,6 + 18 = 7667,6 Kg.
Fe requerido del Fe_2O_3 = 7910,648 – 7667,6 = 243,048
Fe del Fe_2O_3 = 480 x 112/160 = 336
Fe del $Fe_2O_3 \rightarrow FeO$ = 336 – 243,05 = 92,95
FeO a escoria = 92,95 x 72/56 = 119,51

O de este = 119,51 – 92,95 = 26,56
O del Fe_2O_3 = 480 – 336 = 144
O aportado por Fe_2O_3 = 144 – 26,56 = 117,44

O total para oxidación de impurezas = 214,56 + 26,79 + 73,65 + 105,30 = 420,3 Kg.

O aportado por el aire = 420,3 – 117,44 = 302,86
N del aire = 302,86 x 76,8/23,2 = 1002,57
Aire = 1002,57 + 302,86 = 1305,36 Kg.

Escoria = CaO + MnO + SiO_2 + P_2O_5 + FeO

Escoria sin CaO = 60% = 142,87 + 234,09 + 186,91 + 119,51 = 683,38 Kg.

Escoria total = 683,38/0,6 = 1138,97 Kg.

CaO = 1138,97 – 683,38 = 455,59
CO_2 del $CaCO_3$ = 455,59 x 44/56 = 357,96
$CaCO_3$ = 455,59 + 357,96 = 813,55 Kg.

Con los cálculos anteriores, se estructura el balance de las cargas del horno.

2.

Composición de la escoria (24-2)

MnO	=	142,87 Kg.	=	12,54%
SiO_2	=	234,09 Kg.	=	20,56%
P_2O_5	=	186,91 Kg.	=	16,41%
FeO	=	119,51 Kg.	=	10,49%
CaO	=	455,59 Kg.	=	40,00%
		1138,97 Kg.		100,00%

EJERCICIO N°25 (7)

Un horno eléctrico, revestimiento básico, produce 10 toneladas métricas de acero a partir de la siguiente carga:

Chatarra de acero	7000 Kg.
Arrabio	3000 Kg.
Cal	200 Kg.

Durante el calentamiento se utiliza como fundente 1000 kilogramos de escamas de molino y suficiente cal como para producir una escoria con 42%CaO y al final, para recarburar y desoxidar, 100 kilogramos de ferromanganeso y 50 kilogramos de ferrosilicio.

El consumo de electrodos es de 100 kilogramos.

El acero final contiene 98,9%Fe; 0,2%Mn; 0,6%C; 0,07%P; 0,2%Si y 0,03%S.

La chatarra de acero contiene 99,1%Fe; 0,2%Mn; 0,4%C; 0,08%P; 0,15%Si y 0,07%S.

La cal es CaO puro.

Las escamas del molino son Fe_3O_4 puro.

Ferromanganeso: 13%Fe, 5%C, 2%Si, 80%Mn.
Ferrosilicio: 48%Fe, 2%C, 50%Si.
Electrodos: 95%C, 5%SiO_2.
Arrabio: 92,5%Fe; 4%C; 1%Mn; 1%Si; 1,3%P; 0,2%S.
Contenido de calor en la escoria fundida = 500 Kcal./Kg.
Contenido de calor en el acero fundido = 325 Kcal./Kg.
Potencia utilizada = 1500 Kw. para 5 horas.

PREGUNTAS

1. El peso de la cal adicionada como fundente, durante el calentamiento.
2. El peso y la composición de la escoria.
3. La eficiencia térmica del horno.

SOLUCION

1.

Acero final = 10000 Kg.

Fe = 0,989 x 10000 = 9890
C = 0,006 x 10000 = 60
Si = 0,002 x 10000 = 20
Mn = 0,002 x 10000 = 20
P = 0,0007 x 10000 = 7
S = 0,0003 x 10000 = 3

Carga:

Chatarra = 7000 Kg.

Fe = 0,991 x 7000 = 6937
C = 0,004 x 7000 = 28
Si = 0,0015 x 7000 = 10,5
Mn = 0,002 x 7000 = 14
P = 0,0008 x 7000 = 5,6
S = 0,0007 x 7000 = 4,9

Arrabio = 3000 Kg.

Fe = 0,925 x 3000 = 2775
C = 0,04 x 3000 = 120
Si = 0,01 x 3000 = 30
Mn = 0,01 x 3000 = 30
P = 0,013 x 3000 = 39
S = 0,002 x 3000 = 6

Ferromanganeso = 100 Kg.

Fe = 0,13 x 100 = 13
C = 0,05 x 100 = 5
Si = 0,02 x 100 = 2
Mn = 0,80 x 100 = 80

Ferrosilicio = 50 Kg.

Fe = 0,48 x 50 = 24

C = 0,02 x 50 = 1
Si = 0,5 x 50 = 25

Electrodos consumidos = 100 Kg.

C = 0,95 x 100 = 95
SiO_2 = 0,05 x 100 = 5

Escoria = SiO_2 + FeO + MnO + P_2O_5 + CaS + CaO.

58% de escoria = FeO + SiO_2 + MnO + P_2O_5 + CaS

Si cargado = 10,5 + 30 + 2 + 25 = 67,5 Kg.
Si → SiO_2 = 67,5 – 20 = 47,5 Kg.
SiO_2 formado = 47,5 x 60/28 = 101,8 Kg.
SiO_2 a escoria = 101,8 + 5 = 106,8 Kg.

Fe cargado = 6937 + 2775 + 13 + 24 = 9749 Kg.
Fe en Fe_3O_4 = 1000 x 168/232 = 724,1Kg.
Fe total cargado = 9749 + 724,1 = 10473,1 Kg.
Fe → FeO = 10473,1 – 9890 = 583,1 Kg.
FeO a escoria = 583,1 x 72/56 = 749,7 Kg.

Mn cargado = 14 + 30 + 80 = 124 Kg.
Mn → MnO = 124 – 20 = 104 Kg.
MnO a escoria = 104 x 71/55 = 134,3 Kg.

P cargado = 5,6 + 39 = 44,6 Kg.
P → P_2O_5 = 44,6 – 7 = 37,6 Kg.
P_2O_5 a escoria = 37,6 x 142/62 = 86,1 Kg.

S cargado = 4,9 + 6 = 10,9 Kg.
S → CaS = 10,9 – 3 = 7,9 Kg.
CaS a escoria = 7,9 x 72/32 = 17,8 Kg.

Sea X = peso de la escoria:

0,58X = 106,8 + 749,7 + 134,3 + 86,1 + 17,8 = 1094,7 Kg.

CaO en escoria = 1094,7 x 42/58 = 792,7 Kg.
Ca en CaS = 17,8 – 7,9 = 9,9 Kg.
CaO correspondiente = 9,9 x 56/40 = 13,9 Kg.

CaO adicionado como fundente = 792,7 + 13,9 – 200 = 606,6 ≅ 607 Kg.

CaO adicionado como fundente = 607 Kg. (25-1)

Peso y composición de la escoria (25-2)

SiO_2	=	106,8 Kg.	=	5,6%
FeO	=	749,7 Kg.	=	39,7%
MnO	=	134,3 Kg.	=	7,1%
P_2O_5	=	86,1 Kg.	=	4,6%
CaS	=	17,8 Kg.	=	1,0%
CaO	=	792,7 Kg.	=	42,0%
Total escoria	=	1887,4 Kg.		100,0%

3.

Calor en la escoria fundida = 1887,4 x 500 = 943.700 Kcal.
Calor en el acero fundido = 325 x 10000 = 3'250.000 Kcal.
Calor útil = 4'193.700 Kcal.

Potencia de operación = 1500 x 5 x 860 = 6'450.000 Kcal.

Eficiencia = 4'193.700 / 6'450.000 = 0,65

Eficiencia térmica del horno = 65,0% (25-3)

EJERCICIO N°26 (7)

En un horno eléctrico de arco, se trataron 18 toneladas de chatarra de acero inoxidable (18%Cr; 8%Ni; 0,2%Si; 0,03%S) y 6 toneladas de barras de hierro forjado, conteniendo 0,018%S y nada de Ni, Cr ni Si. La escoria al final del período de fusión pesó 1000 libras y contenía 0,5%FeO y 1%Cr_2O_3.; asumir que solamente este hierro y este cromo fueron tomados de la carga original, el balance de la escoria fue adicionado.

Despreciar la oxidación del C de los electrodos, al igual que cualquier aire que pueda entrar al horno.

PREGUNTAS

1. ¿Cuánto ferrocromo (70%Cr) y cuanto niquel pulverizado (98%Ni), deberían ser agregados a la carga para llevar la composición del baño completo a un contenido de 18%Cr y 8%Ni?

2. ¿Cuántas libras de ferrosilicio (80%Si) deberán ser cargadas para reducir todo el FeO a Fe y todo el Cr_2O_3 a Cr, y dejar 0,3%Si en el acero?

3. ¿Cuánto cisco de coque (85%C) será necesario para formar suficiente CaC_2 para reducir el azufre del baño a 0,015%, de acuerdo a la reacción:

$$3(Mn.Fe)S + 2CaO + CaC_2 = 3(Fe.Mn) + 3CaS + 2CO:$$

también para reducir el contenido de FeO del acero de 0,27 a 0,03%, por reacción del FeO con CaC_2 y dejar la escoria con 1,5%CaC_2?

4. Si 1 tonelada de la misma carga de arriba fuera fundida en un horno de inducción Ajax-Northrup de alta frecuencia, donde no se forma CaC_2, ¿cuánto polvo de coque (85%C) sería requerido para desulfurar el acero de acuerdo a la reacción:

$$CaO + (Mn.Fe)S + C = CaS + (Mn.Fe) + CO$$

También para reducir el contenido de FeO del acero de 0,27 a 0,03%? En este caso, permitir un contenido de C en la escoria de 0,5%.

SOLUCION

1.

Chatarra = 18 x 2000 = 36000 libras
Barra de hierro = 6 x 2000 = 12000 libras

Cr en chatarra = 36000 x 0,18 = 6480 lbs.
Cr_2O_3 en escoria = 1000 x 0,01 = 10 lbs.
Cr en escoria = 10 x 104/152 = 6,84 lbs.

Ni en chatarra = 36000 x 0,08 = 2880 lbs.

Sea:
X = baño final
Y = Ferrocromo
Z = polvo de niquel.

En base a las necesidades de cromo y niquel en el baño final y a los contenidos de estos elementos en la carga, vamos a realizar los respectivos balances parciales que nos permitan establecer un sistema de ecuaciones:

Balance parcial para el cromo:

(1) $0,18X = 6480 + 0,7Y - 6,84 = 6473,16 + 0,7Y$

Balance parcial para el niquel:

(2) $0,08X = 2880 + 0,98Z$

Como tenemos 2 ecuaciones con 3 incógnitas, debemos establecer una ecuación más:

FeO en escoria = 1000 x 0,005 = 5 lbs.
Fe de este = 5 x 56/72 = 3,89 lbs.

Carga inicial = 36000 + 12000 = 48000 lbs.
De esta: 48000 – 3,89 – 6,84 = 47989,27 lbs, pasan al baño final.

Balance para el baño final:

(3) $X = 47989,27 + Y + Z$

Sistema de ecuaciones:

(1) $0,18X = 6473,16 + 0,7Y$
(2) $0,08X = 2880 + 0,98Z$
(3) $X = 47989,27 + Y + Z$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, encontramos:

X = baño final = 54140,53 lbs.
Y = Fe-Cr. = 4674,5 lbs.
Z = Polvo de Ni. = 1481 lbs.

Ferrocromo a agregar = 4674,5 lbs. (26-1)
Ni. Pulverulento a adicionar = 1481 lbs. (26-1)

2.
O del Cr_2O_3 = 10 – 6,84 = 3,16 lbs.
O del FeO = 5 – 3,89 = 1,11 lbs.
O total → SiO_2 = 3,16 + 1,11 = 4,27 lbs.

Si requerido = 4,27 x 28/32 = 3,74 lbs.
Si original = 36000 x 0,002 = 72 lbs.

Sea:
W = Fe-Si.
X = acero

Acero sin Si = 100 – 0,3 = 99,7%

$0,997X = 48000 + 4674,5 + 1481 - 72 = 54083,5$
$0,003X = 0,8W - 3,74 + 72 = 0,8W + 68,26$

Siatema de ecuaciones en base al acero y al silicio:

(1) $0,997X = 45083,5$
(2) $0,003X = 68,26 + 0,8W$

Resolviendo el sistema anterior:

X = 54246,2
W = 118,1

Ferrosilicio a agregar = 118,2 lbs (26-2)

3.
Baño final = 54246,2 lbs.

S cargado = 36000 x 0,0003 + 12000 x 0,00018 = 12,96 lbs.

El baño debe quedar con S = 54246,2 x 0,00015 = 8,14 lbs.

S que debe salir del baño = 12,96 – 8,14 = 4,82 lbs.

Reacción:

$3(Mn.Fe)S + 2CaO + CaC_2 = 3(Mn.Fe) + 3CaS + 2CO$

Pesos moleculares: (Mn.Fe)S = 143; CaC_2 = 64

(Mn.Fe)S = 4,82 x 143/32 = 21,54 lbs.
CaC_2 que reacciona = 21,54 x 64/3x143 = 3,21 lbs.

FeO (acero) = 54246,2 x 0,0027 = 146,46 lbs.
FeO que debe quedar en el acero = 54246,2 x 0,0003 = 16,27 lbs.
FeO que reacciona = 146,46 – 16,27 = 130,19 lbs.

Reacción:

$3FeO + CaC_2 = 3Fe + CaO + 2CO$

CaC_2 de esta reacción = 130,19 x 64/3x72 = 38,57 lbs.
CaC_2 en escoria = 1000 x 0,015 = 15 lbs.
CaC_2 total = 3,21 + 38,57 + 15 = 56,78 lbs.

Formación del CaC_2:

$3C + CaO = CaC_2 + CO$

C = 56,78 x 3x12/64 = 31,94 lbs.

Cisco de coque = 31,94/0,85 = 37,6 lbs.

Cisco de coque necesario = 37,6 lbs. (26-3)

4.
Carga inicial:
Chatarra = 36000 lbs. : S = 36000 x 0,0003 = 10,8 Lbs.
Barras de Fe = 12000 lbs.: S = 12000 x 0,00018 = 2,16 lbs
S total = 12,96 lbs

%S (carga inicial) = 12,96/48000 = 0,00027 = 0,027%

Reacción de desulfuración:

CaO + (Mn.Fe)S + C = CaS + (Mn.Fe) + CO

S (nueva carga) = 2000 x 0,00027 = 0,54 lbs.
(Mn.Fe)S = 0,54 x 143/32 = 2,41 lbs.
C (desulfuración) = 2,41 x 12/143 = 0,2 lbs.

Acero inicial = 54140,5 lbs.

Carga total = 48000 + 4674,5 + 1481 = 54155,5 lbs.

Adiciones nuevas:

Fe-Cr = 4674,5 x 2000/48000 = 194,77 lbs.
Polvo de Ni. = 1481 x 2000/28000 = 61,71 lbs.

Carga nueva = 2000 + 194,77 + 61,71 = 2256,48 lbs.

Acero nuevo = 54140,5 x 2256,48/54155,5 = 2255,85 lbs.

FeO (inicial) = 2255,85 x 0,0027 = 6,09 lbs.
FeO que debe quedar = 2255,85 x 0,0003 = 0,68 lbs.
FeO que reacciona = 6.09 – 0,68 = 5,41 lbs.

FeO + C = Fe + CO

C = 5,41 x 12/72 = 0,90 lbs.

Escoria nueva = 1000 x 2000/48000 = 41,7 lbs.

C en escoria = 41,7 x 0,005 = 0,21 lbs.

C a adicionar = 0,2 + 0,9 + 0,21 = 1,31 lbs.

Cisco de coque = 1,31/0,85 = 1,54 lbs.

Cisco de coque requerido = 1,54 lbs (26-4)

CAPITULO IX

PRODUCCION DEL SOPLO
Y
CORRIENTES DE AIRE

EJERCICIO Nº1 (7)

El gas de un alto horno presenta el siguiente análisis:

CO	26%	CH_4	1%
CO_2	10	H_2O	2
H_2	2	N_2	59

El horno produce 400 toneladas de arrabio por día y 3900 m^3 de gas por tonelada de arrabio. El soplo es precalentado a 600ºC en estufas que trabajan con una eficiencia del 65%. El gas sobrante es utilizado en máquinas a gas a una eficiencia termomecánica de 25%. El soplo es comprimido a 1 atmósfera de presión barométrica y a una eficiencia de 85%.

PREGUNTAS

1. El porcentaje del gas requerido por las estufas.
2. La potencia utilizada en comprimir el soplo.
3. El sobrante de potencia disponible, después de haber sido provistas las estufas y las máquinas de soplado, en kilovatios.

SOLUCION

1.

Gas producido = 400 x 3900 = 1'560.000 m^3/día.

N_2 en gas = 1'560.000 x 0,59 = 920.400
Soplo = 920400 / 0,79 = 1'165.063 m^3/día

Contenido de calor en el soplo a 600ºC =
= 1'165.963 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 600) x 600 = 220'336.715 Kcal./día.

El contenido de calor suministrado por el combustible a las estufas =
= 220'336.715 / 0,65 = 338'979.562 Kcal./día.

Contenido de calor que puede suministrar 1 m^3 de gas:
CO = 3034 x 0,26 = 788,84 Kcal.
H_2 = 2582 x 0,02 = 51,64
CH_4 = 8560 x 0,01 = 85,60
Calor que puede suministrar el gas = 926,08 Kcal./m^3

Gas requerido por las estufas = 338'979.562 Kcal. / 926,08 Kcal./m^3 = 366037 m^3

Gas requerido por las estufas = 366037 / 1'560.000 = 0,234

Gas requerido por las estufas = 23,4% (1-1)

2.

Para la solución a esta pregunta, vamos a utilizar el *método diagramático*, el cual se apoya el la Figura #1:

La figura 1.a, representa un cilindro que contiene un pistón que puede realizar el recorrido AC. Inicialmente el cilindro es llenado con aire no comprimido y el pistón se encuentra en la posición A.

En la figura 1.b, representa una gráfica de la presión P en el cilindro, contra el cambio de volumen ΔV del cilindro ocupado por el aire a la derecha del pistón.

Cuando el cilindro se encuentra en la posición A, P = 1 atmósfera y $\Delta V = 0$.

Supongamos que el cilindro se mueve hacia la derecha hasta alcanzar la posición B, en este caso, el aire resulta comprimido y se encuentra confinado al espacio BC.

Si la temperatura dentro del cilindro no cambia, la presión del aire crecerá en proporción inversa a su volumen, de acuerdo a la ley de Boyle.

Supongamos que el incremento de presión está representado por la recta AB (Fig. 1.b), aunque realmente es una curva.

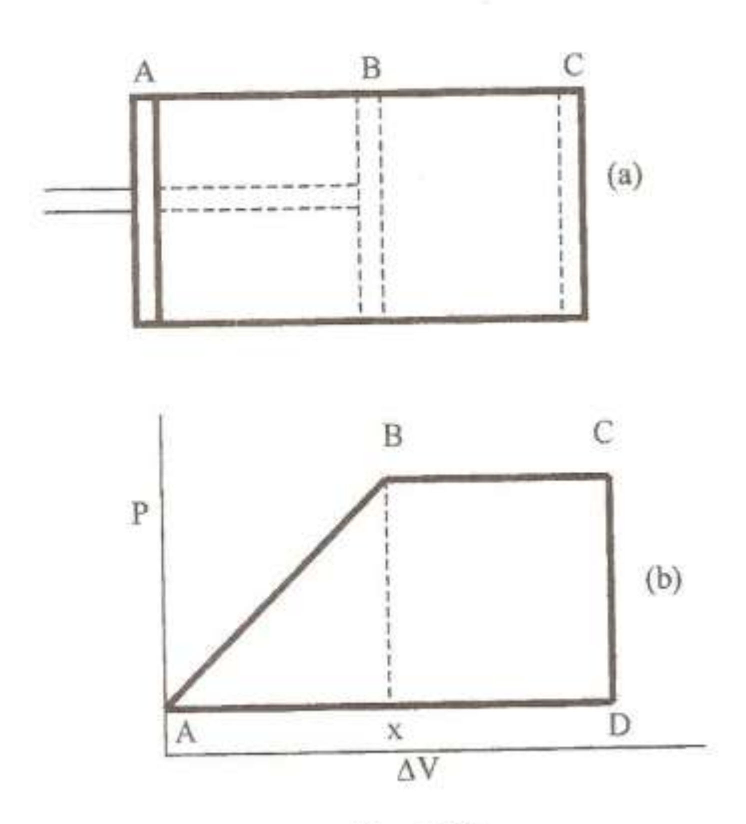


Figura N°1.

Asumamos que en la posición B el aire ha alcanzado la presión deseada, P_1, y que durante el recorrido BC no existen cambios de presión, lo cual se logra a través de un sistema de válvulas. (P_1 será la presión total = presión barométrica + presión atmosférica). Al final del recorrido, se admite aire de nuevo en el cilindro y la presión cae de nuevo a D (= A), como para iniciar de nuevo. La caida de presión en este caso = CD.

El trabajo realizado por el pistón es el producto ΔV por la presión actuante. Matemáticamente, este trabajo es el área ABCDA, Fig. 1.b, la cual está compuesta por un rectángulo y un triángulo, cuya altura el = presión barométrica = $P_1 - P_0$; siendo P_0 = presión atmosférica.

Para calcular el área, es solamente necesario determinar que fracción del recorrido total AD, corresponde a BC (= xD), la fracción restante del recorrido es Ax = 1 – xD.

Puesto que la posición B se alcanza durante la compresión, es decir, cuando se llega a P_1 y dado que el volumen es inversamente proporcional a la presión, $xD = P_0/P_1$.

Sobre las bases anteriores, tratemos de efectuar el cálculo solicitado.

1 atm. = 10333 $Kg./m^2$
1 Kw = 102 Kg-m/seg.

Soplo = 1'165.063 (m^3/día) x 1 día/24 hr x 1 hr/60 min. x 1 min./60 seg.
= 13,5 m^3/seg. = V_0

P_0 = 1 atm. = 10333 $Kg./m^2$
Presión barométrica = 1 atm.
P_1 = 2 x 10333 = 20666 $Kg./m^2$

Sea W = área ABCD
Area ABCD = Area ABx + Area xBCD

$XD = P_0/P_1$ = 10333/20666 = 0,5

CD = 10333 $Kg./m^2 = P_0$

Area xBCD = (xD) · (CD) = 10333 x 0,5 = 5166,5 $Kg./m^2$

Ax = 1 – xD = 1 – 0,5 = 0,5

Area ABx = [(Ax) · (xB = CD)]/2
Area ABx = 0,5 x 10333/2 = 2583,25 Kg./m^2

Area total = ABx + xBCD = 2583,25 + 5166,5 = 7749,75 Kg./m^2

Potencia = 13,5 (m^3/seg.) x 7749,75 (Kg./m^2) = 104621,63 Kg.-m/seg.
Potencia requerida = 104621,63 / 102 = 1025 Kw.

Potencia utilizada = 1025/0,85 = 1205 Kw.

Potencia utilizada = 1205 Kw. (1-2)

Existe otro método para el cálculo de esta potencia y es con la ayuda de la denominada *fórmula adiabática*, la cual permite determinar el trabajo realizado en una *compresión adiabática.*

$$W = \frac{k}{k-1} V_0 P_0 \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \qquad (1)$$

V_0 = volumen del gas antes de la compresión, medido a la presión P_0; puede representar también en volumen por unidad de tiempo, en cuyo caso, la fórmula da la potencia requerida (a 100% de eficiencia mecánica).

$k = C_P/C_V$, para el aire vale 1,408
C_P = calor específico a presión constante.
C_V = " " volumen constante.

Para el aire, la ecuación toma la siguiente forma:

$$W = 3{,}45 V_0 P_0 \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{0,29} - 1 \right] = \text{potencia} \qquad (1)$$

V_0 = 13,5 m^3/seg.
P_0 = 10333 Kg./m^2
$P_1 = P_0$ + presión barométrica = 10333 + 10333 = 20666 Kg./m^2

$$W = 3{,}45x13{,}5\frac{m^3}{seg.}x10333\frac{Kg.}{m^2}\left[\left(\frac{20666}{10333}\right)^{0,29} - 1\right] = 107147{,}74 \text{ Kg.-m/seg.}$$

W = 107147,74/102 = 1050,5 Kw.

Potencia utilizada = 1050,5/0,85 = 1236 Kw

Potencia utilizada = 1236 Kw (1-2)

La diferencia en los resultados de los dos métodos, puede deberse a que en el método diagramático hemos supuesto, por comodidad que la variación de la presión con el volumen es una recta, cuando en realidad es una curva.

2.

Gas sobrante = 1'560.000 – 366037 = 1'193.963 m^3/día.

Potencia calorífica de este = 1'193.963 x 926,08 = 1105'705.255 Kcal./día.
= 46'071.052 Kcal./hr.

Potencia equivalente = 46'071.052 x 0,25/860 = 13393 Kw.

Potencia sobrante = 13393 – 1205 = 12188 Kw.

Potencia sobrante = 12188 Kw. (1-3)

EJERCICIO N°2 (7)

Un alto horno produce 1020 toneladas cortas de arrabio por día, utiliza 92400 pies cúbicos (condiciones normales) de soplo, por tonelada de arrabio y produce un gas que presenta el siguiente análisis:

CO	23,8%
CO_2	13,3
H_2O	1,3
H_2	2,5
N_2	59,1

El horno utiliza por tonelada de arrabio, 1760 libras de coque con 87%C. El arrabio contiene 3,5%C.

El soplo es precalentado a 700°C; las estufas operan con una eficiencia térmica del 68%. El gas sobrante es utilizado en máquinas a gas que tienen una eficiencia termomecánica del 24%. La presión manométrica del soplo es de 19 lbs./in^2. Las máquinas de soplado trabajan con una eficiencia del 90%.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de gas producido, por tonelada de arrabio.
2. Las libras de $CaCO_3$ utilizado, por tonelada de arrabio.
3. El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas, y el porcentaje utilizado para la reducción directa, encima de las toberas.
4. El porcentaje del poder de calentamiento del coque que es desarrollado en las toberas.
5. El porcentaje del gas del horno que es requerido por las estufas.
6. La potencia generada en las máquinas a gas.
7. la potencia requerida para comprimir el soplo, calculada (a) por la fórmula adiabática y (b) por el diagrama teórico indicador.

SOLUCION

1.

N_2 en soplo = N_2 en gas.

N_2 en soplo = 92400 x 0,79 = 72996 ft^3

Gas = 72996 / 0,591 = 123513

Gas producido = 123513 ft^3/ton. de arrabio. (2-1)

2.

Sea X = peso del $CaCO_3$

C en $CaCO_3$ = X · 12/100 = 0,12X

CO en gas = 123513 x 0,238 = 29396 ft^3

CO_2 en gas = 123513 x 0,133 = 16427 ft^3

C en CO = 29396 x 12/359 = 982,6 lbs.

C en CO_2 = 16427 x 12/359 = 549,1 lbs.

Total C en gas = 1531,7 lbs.

C en arrabio = 2000 x 0,035 = 70 lbs.

C en coque = 1760 x 0,87 = 1531,2 lbs.

C del coque → gas = 1531,2 – 70 = 1461,2 lbs.

Total C en gas = 1461,2 + 0,12X = 1531,7

X = (1531,7 – 1461,)/0,12 = 589,2

Peso del $CaCO_3$ utilizado = 589,2 lbs./ton. de arrabio (2-2)

3.

O_2 del soplo = 92400 – 72996 = 19404 ft^3

Reacción en las toberas:

$2C + O_2 = 2CO$

C = 19404 x 24/359 = 1297,2 lbs.

C del coque consumido en las toberas = 1297,2/1531,2 = 0,847

C del coque consumido en las toberas = 84,7% (2-3)

C para reducción directa = 1531,2 – 1297,2 = 164 lbs.

C del coque para reducción directa = 164/1531,2 = 0,107

C del coque para reducción directa = 10,7% (2-3)

4.

Calculamos la potencia calorífica total del coque:

P.C.B = 14600C + 61000 x (H – O/8) + 4000S – 1050 x (9H + W)

Suponiendo que el H_2 de los gases proviene del coque y que el H_2O proviene de la humedad de la carga, la potencia calorífica del coque quedaría:

H_2 = 123513 x 0,025 x 2/359 = 17,2 lbs.

P.C.B = 14600 x 1531,2 + 61000 x (17,2 – 0) + 0 – 1050 x (9 x 17,2 + 0) = 23'242.180 BTU.

El calor no desarrollado se encuentra en el gas, representado por el H_2 y el CO; y en el C del arrabio.

Calor no desarrollado = 0,238 x 123513 x 341 + 0,025 x 123513 x 290 + 14600 x 70
= 11'940.388 BTU.

Calor desarrollado = 23'242.180 – 11'940.388 = 11'301.792 BTU.

Calor desarrollado = 11'301.792/23'242.180 = 0,4862

Calor del coque desarrollado en el horno = 48,62% (2-4)

5.

Vamos a desarrollar este punto en metros cúbicos:

Soplo = 92400 /35,3145 = 2616,4 m^3

Gas = 123513 /35,3145 = 3497,5 m^3

Contenido de calor del soplo a 700ºC = 2616,4 x (0,302 + $2{,}2 \times 10^{-5}$ x 700) x 700 =
= 581.311,75 Kcal.

Calor en gas = 0,238 x 3040 + 0,025 x 2582 = 786,642 Kcal./m^3

Las estufas trabajan al 68% de eficiencia.

Calor total en estufas = 581311,75/0,68 = 854870,22 Kcal.

Gas requerido por las estufas = 854870,22 Kcal. / 786,642 Kcal./m^3 = 1086,74 m^3

Gas requerido por las estufas = 1086,74 / 3497,5 = 0,3107

Gas requerido por las estufas = 31,07% (2-5)

6.

Gas total = 3497,5 x 1020 = 3'567.450 m^3

Gas $\rightarrow$ estufas = 1086,74 x 1020 = 1'108.475 m^3

Gas sobrante = 3'567.450 – 1'108.475 = 2'458.975 m^3

P.C.B de este = 2'458.975 m^3 x 786,642 Kcal./m^3 = 1934'333.012 Kcal./día.
P.C.B de este = 1934'333.012 / 24 = 80'597.209 Kcal./hr.

Potencia generada en máquinas a gas = 80'597.209 x 0,24 / 860 = 22492 Kw.

Potencia generada en máquinas a gas = 22492 Kw. (2-6)

7.a

Utilizando la ecuación adiabática (Expresión 1):

V_0 = 92400 x 1020 / 35,3145 = 2'668.819 m^3/día = 2'668.819/86400 = 30.9 m^3/seg.
P_0 = 1 atm. = 10333 Kg./m^2
P_1 = 14,7 + 19 = 33,7 lbs./in^2 = 33,7 / 14,7 = 2,29 atm.

Potencia = 3,45 x 30,9 x 10333 x $[(2,29/1)^{0,29} - 1)]$ = 299187 Kg.-m/seg.

Las máquinas de soplado tienen una eficiencia del 90%

Potencia requerida para comprimir el soplo = 299187/0,9x102 = 3259 Kw.

Potencia requerida para comprimir el soplo = 3259 Kw. (2-7.a)

7.b

Sobre la base de la Fig. 1, aplicaremos el método diagramático:

V_0 = 30,9 m^3/seg.
P_0 = 14,7 psi.
P_1 = 33,7 psi.
xD = 14,7/33,7
Ax = 19/33,7

Area xBCD = 19 x 14,7/33,7 = 8,29 psi.
Area ABx = (1/2) x 19 x 19/33,7 = 5,36 psi.
Area total = 13,65 psi.
Area total = 13,65/14,7 = 0,929 atm.

Potencia = 30,9 x 0,929 x 10333 / 0,9 x 102 = 3231,2 Kw.

Potencia requerida para comprimir el soplo = 3231,2 Kw. (2-7.b)

EJERCICIO N°3 (7)

El alto horno del ejercicio #5 del capítulo VII, utiliza una presión de soplado de 1 atmósfera (manométrica); y tiene capacidad para 600 toneladas largas por día.

Este horno tiene 120 pies de altura, por encima de la boca de carga. El soplo es precalentado a 540°C. La eficiencia térmica de las estufas es del 70%.

El gas sobrante es convertido en potencia en las máquinas a gas, con 25% de eficiencia termomecánica.

PREGUNTAS

1. La potencia requerida para suministrar el soplo (utilizar el método adiabático y el diagramático).
2. El porcentaje del gas utilizado en las estufas.
3. La potencia que puede ser generada por el gas remanente.
4. La potencia requerida para elevar la carga sólida a la parte superior del horno.

SOLUCION

1.
Método adiabático:

$W = 3{,}45 \times V_0P_0 \times [(P_1/P_0)^{0{,}29} - 1)]$

Soplo = 137000 ft^3/ton.
Soplo total = 137000 x 600 = 82'200.000 ft^3/día = 82'200.000/35,3145
= 2'327.656 m^3/día = 2'327,656/86400 = 27 m^3/seg.

$V_0 = 27$ m^3/seg.
$P_0 = 10333$ Kg./m^2 = 14,7 psi. = 1 atm.
$P_1 = 14{,}7 + 14{,}7 = 29{,}4$ psi. = 29,4/14,7 = 2 atm.

$W = 3{,}45 \times 27 \times 10333 \times [(2/1)^{0{,}29} - 1)] = 214295{,}49$ Kg.-m/seg.
W = 214295,49/102 = 2100,9 Kw.

1 Kw = 1,341 H.P

W = 2100,9 x 1,341 = 2817 H.P

Potencia requerida = 2817 H.P (3-1)

Método diagramático (Fig. #1):

$V_0 = 27$ m^3/seg.
$P_0 = 14{,}7$ psi.
$P_1 = 29{,}4$ psi.

$xD = P_0/P_1 = 14{,}7/29{,}4 = 0{,}5$
$Ax = 1 - xD = 1 - 0{,}5 = 0{,}5$

Area xBCD = 0,5 x 14,7 = 7,350 psi.
Area ABx = 0,5 x 0,5 x 14,7 = 3,675 psi.
Area total = 11,025 psi. = 11,025/14,7 = 0,75 atm

W = 27 x 0,75 x 10333 = 209243,35 Kg.-m/seg.
W = 209243,35 / 102 = 2051,4 Kw.
W = 2051,4 x 1,341 = 2750,9 H.P

Potencia requerida = 2750,9 H.P (3-1)

2.
CO = 36331 ft^3
Gas total = 169982 ft^3 = 4823,4 m^3/ton de arrabio.
Soplo = 137000 ft^3 = 3880 m^3/ton de arrabio.

CO = 36331/169982 = 21,4%

Calor en gas = 0,214 x 3034 = 649,276 Kcal./m^3

Precalentamiento del aire a 540°C = 3880 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 540) x 540 = 657641 Kcal.
Eficiencia de las estufas = 70%
Calor total en estufas para precalentar = 657641/0,7 = 939488 Kcal.

Gas a estufas = 939488 Kcal./649,276 Kcal./m^3 = 1447 m^3

Gas utilizado en estufas = 1447/4813,4 = 0,301

Gas utilizado en estufas = 30,1% (3-2)

3.

Gas remanente = 4813,4 – 1447) x 600 = 2'019.840 m^3/día.

Calor que genera este gas = 2'019.840 x 0,214 x 3034 = 1311'433.636 Kcal./día
= 1311'433.636 / 24 = 54'643.068 Kcal./hr.

(calor útil/calor total) = 0,25

Calor útil = 54'643.068 x 0,25 = 13'660.767 Kcal./hr.

1 H.P = 641,8 Kcal./hr.

Calor útil = 13'660.767/641,8 = 21285 H.P

Potencia que puede generar el gas remanente = 21285 H.P (3-3)

4.

1 tonelada larga = 2240 libras.

Potencia = mgh

mg = carga = 2240 x 600 = 1'344.000 lbs./día
h = altura = 120 ft.

Potencia = 1'344.000 lbs./día x 120 ft. X 1 día/24 hr x 1 hr/60 min. x 1 min./60 seg.
= 1866,7 lb.-ft/seg.

1 lb.-ft/seg. = 0,00182 H.P

Potencia requerida para elevar la carga = 1866,7x 0,00182/0,25 = 13,6 H.P

Potencia requerida para elevar la carga = 13,6 H.P (3-4)

EJERCICIO N°4 (7)

Un alto horno produce 720 toneladas métricas de arrabio por día y salen, por tonelada, 4084 metros cúbicos de gas de la siguiente composición: 24,7%CO; 14,3%CO_2; 0,5%H_2 y 60,5%N_2.

Parte de este gas es utilizado en las estufas que calientan el soplo de 0°C a 750°C a una eficiencia térmica del 65%. El soplo es utilizado a una presión manométrica de 20 psi.

El resto del gas es utilizado en máquinas a gas que producen potencia para las máquinas de soplado y ponen en marcha generadores eléctricos. Las máquinas de soplado tienen una eficiencia termomecánica del 90% y 85% de eficiencia para reparto volumétrico (ver aclaración en ejercicio #5); los generadores operan al 92% de eficiencia, y las máquinas a gas a 25% de eficiencia.

PREGUNTAS

1. La proporción del gas que debe ser enviado a las estufas.
2. La proporción del gas necesaria para poner en marcha las máquinas de soplado.
3. La potencia disponible para los generadores.

SOLUCION

El esquema de flujo de los gases se muestra el la Figura N°2.

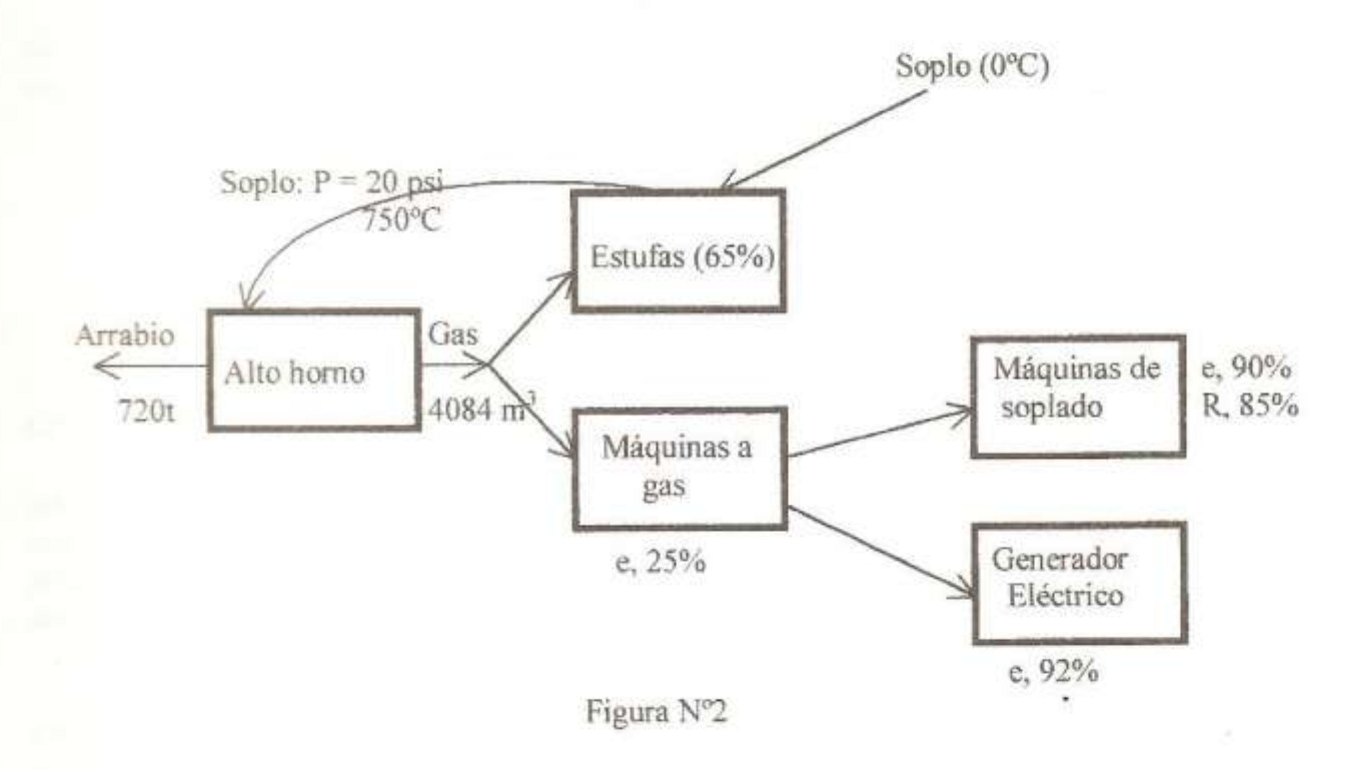


Figura N°2

1.

Para determinar la cantidad de gas que debe ser enviado a las estufas, utilizaremos la siguiente expresión:

$$m^3 \text{ de gas} = \frac{\text{Calor total}}{\text{Calor}/m^3 \text{ de gas}} \qquad (2)$$

N_2 en gas = N_2 en soplo

Gas producido = 720 x 4084 = 2'940.480 m^3
N_2 en gas = 2'940.480 x 0,605 = 1'778.990,4 m^3
Soplo = 1'778.990,4/0,79 = 2'251.886,6 m^3/día.

Precalentamiento del soplo a 750°C = 2'251.886,6 x (0,302 + $2{,}2 \times 10^{-5}$ x 750) x 750
= 537'919.410 Kcal.

Las estufas trabajan con 65% de eficiencia (Fig. #2):

Calor total = 537'919.410/0,65 = 827'568.330 Kcal.

Calor producido por el gas = CO + H_2

CO = 0,247 x 3034 = 749,398 Kcal.
H_2 = 0,005 x 2582 = 12,910 Kcal.
Calor producido por el gas = 762,308 Kcal./m^3

Gas requerido por las estufas = 827'568.330 Kcal. / 762,308 Kcal./m^3 = 1'085.608,9 m^3

Gas requerido por las estufas = 1'085.608,9/2'940.480 = 0,369
Gas requerido por las estufas = 36,9% (4-1)

2.

La proporción de gas necesaria para poner en marcha las máquinas de soplado, puede ser calculada sobre la base de la potencia requerida para el soplado y esta la determinaremos con la ayuda de la ecuación (1), es decir, utilizando la fórmula adiabática:

$W = 3{,}45\ V_0P_0 \cdot [(P_1/P_0)^{0,29} - 1)]$

$V_0 = (2'251.887/0{,}85) \cdot [(750 + 273)/273]{\cdot}m^3/\text{día} \times 1\ \text{día}/86400\ \text{seg.} = 115\ m^3/\text{seg.}$
$P_0 = 14{,}7$ psi. = 1 atm.
$P_1 = P_0 + 20 = 14{,}7 + 20 = 34{,}7$ psi. = 34,7/14,7 = 2,36 atm.

1 atm. = 10333 Kg./m^2; 1 Kw = 102 Kg./m^2

$W = 3{,}45 \times 115\ m^3/\text{seg.} \times 1\ \text{atm} \times 10333\ (\text{Kg.}/1\ \text{atm} \times m^2) \times [(2{,}36)^{0,29} - 1]$
= 1'159.196,7 Kg.-m/seg.

W = 2'159.196,7 / 0,9x102 = 12627,4 Kw.

1 Kw-hr. = 860 Kcal.

W = 12627,4 x 860 = 10'859.577 Kcal./hr.

$$Gas = \frac{10'859.577\ Kcal./hr}{762{,}3\ Kcal./m^3} x \frac{24\ \text{hr}}{1\ \text{día}} = 341899{,}31 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Proporción de gas = 341,899,31/2'940.480 = 0,116

Proporción de gas para máquinas de soplado = 11,6% (4-2)

3.

Gas total = Gas (máquinas a gas) + gas (estufas)

Gas → máquinas a gas = 2'940.480 – 1'085.609 = 1'854.871 m^3/día.

Gas → máquinas de soplado = 341900 m^3/día.

Gas (máquinas a gas) → generadores = 1'854.871 – 341900 = 1'512.971 m^3/día.
= 1'512.971/24 = 63040 m^3/hr.

Calor en máquinas a gas → generadores = CO + H_2

CO = 63040 x 0,247 x 3034 = 47'242.050
H_2 = 63040 x 0,005 x 2582 = 813.846
Calor total = 48'055.896 Kcal./hr.

Calor útil / calor total = 0,25

Calor útil (máquinas a gas) → generadores = 48'055.896 x 0,25 = 12'013.974 Kcal./hr.

$$Potencia\ \text{generdores} = \frac{12'013.974 \cdot \text{Kcal./hr.}}{860 \cdot \frac{\text{Kcal./hr.}}{\text{Kw}}} x 0{,}92 = 12892\ Kw$$

Potencia útil en los generadores = 12852 Kw (4-3)

EJERCICIO N°5 (7)

Un alto horno produce 880 toneladas métricas de arrabio por día y consume por tonelada de arrabio 1640 kilogramos de mineral, 920 kilogramos de coque y 260 kilogramos de $CaCO_3$. El arrabio contiene 3,6%C y el coque analiza 88%C.

El gas del alto horno está compuesto por lo siguiente:

CO	24,7%
CO_2	14,3
CH_4	0,5
N_2	60,5

El soplo es precalentado a 650°C en estufas que trabajan a una eficiencia térmica de 62%.

El gas que no es requerido por las estufas, es utilizado para producción de potencia en máquinas a gas que operan a una eficiencia termomecánica de 23%. Las máquinas a gas impulsan las máquinas de soplado, las cuales suministran el soplo al horno, al igual que generadores eléctricos que producen potencia adicional. Las máquinas de soplado operan a 90% de eficiencia mecánica, y el coeficiente de reparto de aire es de 94%. Los generadores poseen una eficiencia del 92%.

La presión manométrica del soplo es de 22 psi.

La carga es elevada a la parte de arriba del horno, por un skip automático operado eléctricamente a 75% de eficiencia; altura de levantamiento, 25 metros. Asumir que el levantamiento se realiza en ¼ del tiempo.

PREGUNTAS

1. El volumen del gas y del soplo, por tonelada de arrabio.
2. La proporción del gas total que es requerido por las estufas.
3. La potencia producida por las máquinas a gas.
4. La potencia requerida para mover las máquinas de soplado, calculada a partir del diagrama teórico indicador y a partir de la fórmula adiabática.
5. la potencia requerida por el elevador.
6. La potencia sobrante, y el consumo neto de coque por tonelada de arrabio después de adicionar esta potencia sobrante al horno.

SOLUCION

1.

Para el cálculo del volumen de gas, utilizaremos la siguiente expresión, ya utilizada en capítulos anteriores:

$$m^3 \text{ de gas} = \frac{\text{C total en gas}}{\text{C}/m^3 \text{ de gas}} \qquad (3)$$

C total en gas = C en coque + C en $CaCO_3$ – C en arrabio

C total en gas = 920 x 0,88 + 260 x 0,12 – 1000 x 0,036 = 804,8 Kg.

Supongamos 1 m^3 de gas:

C en gas = (0,247 + 0,143 + 0,005) x 12/22,4 = 0,2116 Kg./m^3

Gas = 804,8/0,2116 = 3803,4 m^3

Volumen del gas = 3803,4 m^3/ton. de arrabio (5-1)

N_2 en gas = N_2 en soplo

N_2 en gas = 3803,4 x 0,605 = 2301 m^3

Soplo = 2301/0,79 = 2912,7 m^3

Volumen del soplo = 2912,7 m^3/ton. de arrabio (5-1)

2.
Volvemos a utilizar la ecuación (2):

Gas total = 3803,4 x 880 = 3'346.992 m^3/día
Soplo total = 2912,7 x 880 = 2'563.176 m^3/día.

Precalentamiento del soplo a 650°C = 2,563.176 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 650) x 650
= 526'976.170 Kcal.

La eficiencia térmica de las estufas es de 62%

Calor total = 526'976.170/0,62 = 849'961.560 Kcal./día.

Potencia calorífica del gas = 0,247 x 3034 + 0,005 x 8560 = 792,198 Kcal./m^3

Gas requerido por las estufas = 849'961.560/792,198 = 1'072.915,6 m^3/día.

Gas requerido por las estufas = 1'072.915,6 / 3'346.992 = 0,3206

Gas requerido por las estufas = 32,06% (5-2)

3.
El flujo de los gases en este ejercicio, se ajusta al de la Figura N°2.

Gas total = gas a estufas + gas a máquinas a gas.

Gas → máquinas a gas = 3'346.992 – 1'072.915,6 = 2'274.076,4 m^3/día.

Calor que aporta este gas = CO + CH_4
CO = 2'274.076,4 x 0,247 x 3034 = 1704'188.300
CH_4 = " x 0,005 x 8560 = 97'330.470
Poder calórico total de este gas = 1801'518.800 Kcal./día.

Poder calórico total = 1801'518.800 / 24 = 75'063.282 Kcal./hr.

La eficiencia termomecánica de las máquinas a gas es del 23%

Calor útil / calor total = 0,23

Calor útil = 75'063.282 x 0,23 = 17'264.555 Kcal./hr

1 Kw = 860 Kcal/hr

Potencia = 17'264.555 / 860 = 20075 Kw.

Potencia producida en máquinas a gas = 20075 Kw. (5-3)

4.
El término *coeficiente de reparto* o *eficiencia volumétrica* se utiliza aquí, para expresar la relación entre la cantidad de aire alimentado al horno, a la cantidad que entra al cilindro de compresión.

Método del diagrama teórico indicador (Fig. #1):

P_0 = 14,7 psi. = 1 atm
P_1 = 14,7 + 22 = 36,7 psi.

$xD = P_0/P_1 = 14{,}7/36{,}7$
$Ax = 1 - xD = 22/36{,}7 = 1 - 14{,}7/36{,}7$
Altura = xB = 22

Area del rectángulo = (xD) · (CD) = 22 x 14,7/36,7 = 8,81
Area del triángulo = ½ · (Ax) · (Bx) = ½ x 22 x 22/36,7 = 6,59
Area total = 15,40 psi. = 1,048 atm

$$V_0 = \frac{2'563.176}{0{,}94} \frac{m^3}{día} x \frac{1\,\text{día}}{24\,\text{hr}} x \frac{1\,\text{hr}}{3600\,\text{seg.}} = 31{,}5 \frac{m^3}{seg.}$$

Potencia = 31,5 (m^3/seg) x 1,048 atm. X 10333 (Kg./m^2)·(1/atm) = 341113 Kg.-m/seg.

1 Kw = 102 Kg.-m/seg.

Potencia requerida = 341113/102x0,9 = 3715,8 Kw.

Potencia requerida por máquinas de soplado = 3715,8 Kw (5-4)

Método de la fórmula adiabática:

Potencia = $3{,}45 V_0 P_0 x\, [(P_1/P_0)^{0{,}29} - 1)]$

$V_0 = 32{,}5\ m^3$/seg.
$P_0 = 14{,}7$ psi. = 1 atm.
$P_1 = 14{,}7 + 22 = 36{,}7$ psi. = 2,5 atm.

$$Potencia = 3{,}45x31{,}5 \frac{m^3}{seg.} x1\,\text{atm.}x10333 \frac{\text{Kg.}}{\text{m}^2} \frac{1}{atm} \left[\left(\frac{2{,}5}{1} \right)^{0{,}29} - 1 \right]$$

$$= 341795 \frac{Kg.-m}{seg.}$$

5.
E = mgh

h = altura a elevar = 25 m.
Peso = mg = (1640 + 920 + 260) x 880 = 2'481.600 Kg./día.

El tiempo de levantamiento = ¼ de día. = 0,25 días.

$$Peso = 2'481.600 \frac{Kg.}{0{,}25\,\text{día}} x \frac{1\,\text{día}}{24\,\text{hr.}} x \frac{1\,\text{hr}}{3600\,\text{seg.}} = 114{,}9 \frac{Kg.}{seg.}$$

E = 114,9 x 25 = 2872,5 Kg.-m/seg.

Eficiencia = 75%

Potencia = 2872,5/0,75 = 3830 Kg.-m/seg.
Potencia = 3830/102 = 37,5 Kw.

Potencia requerida por el elevador = 37,5 Kw (5-5)

6.
De acuerdo al diagrama de la Fig. #2:

Gas (máquinas a gas) = gas (máquinas de soplado) + gas (generadores)

Potencia a generadores = 20075 – 3723 = 16352 Kw.

Eficiencia en generadores = 92%

Potencia sobrante útil = 16352 x 0,92 = 15044 Kg.

Potencia sobrante útil = 15044 Kw (5-6)

Consumo de coque por tonelada de arrabio:

Calor adicionado de la potencia sobrante = 16352 x 860 x 24/880 = 383529 Kcal.

C del coque que quema en toberas = C total – C en CH_4 – C en arrabio.

CH_4 = 3803,4 x 0,005 = 19 m^3
C en CH_4 = 19 x 12/22,4 = 10,2 Kg.

C del coque que quema en toberas = 920 x 0,88 – 10,2 – 1000 x 0,036 = 763,4 Kg.

Reacción en toberas: $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$

Calor de esta combustión = 763,4 x 2430 = 1'855.062 Kcal.

Calor neto = 1'855.062 – 383529 = 1'471.533 Kcal.

C necesario para producir este calor = 1'471.533/2430 = 605,5 Kg.

Coque equivalente = 605,5/0,88 = 688,1 Kg.

Consumo de coque después de adicionar la potencia sobrante = 688,1 Kg. (5-6)

EJERCICIO Nº6 (7)

Un convertidor Bessemer es cargado con 18 toneladas largas de arrabio de la siguiente composición:

Fe	93,2%
C	3,6
Si	1,8
Mn	1,4

El soplo oxida todas las impurezas, y en adición se oxidan 1200 libras de Fe durante el segundo período. Dos tercios del carbono pasan a CO y el resto a CO_2.

Las máquinas de soplado suministran el aire a una rata de 17000 ft^3/min., medido a condiciones normales. El soplo es alimentado a una presión manométrica de 2 atmósferas.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire, a condiciones normales, necesario para el soplado de la carga.
2. El tiempo de duración de cada período de soplado.
3. Las composiciones de la escoria y los gases.
4. La potencia requerida para poner en marcha las máquinas de soplado, asumiendo una eficiencia del 80%.

SOLUCION

1.

1 tonelada larga = 2240 libras.

Arrabio = 18 x 2240 = 40320 lbs.

Fe = 0,932 x 40320 = 37578,24
C = 0,036 x 40320 = 1451,52
Si = 0,018 x 40320 = 725,76
Mn = 0,014 x 40320 = 564,48

Oxidaciones:

$C + ½ O_2 = CO$:	O_2 = 2/3 x 1451,52 x 0,5 x 359/12	= 14474,88 ft^3
$C + O_2 = CO_2$:	O_2 = 1/3 x 1451,52 x 359/12	= 14474,88
$Si + O_2 = SiO_2$:	O_2 = 725,76 x 359/28	= 9305,28
$Mn + ½ O_2 = MnO$:	O_2 = 564,48 x 359/2x55	= 1842,26
$Fe + ½ O_2 = FeO$:	O_2 = 1200 x 359/2x56	= 3846,43
O_2 total para oxidaciones		= 43943,73 ft^3

Aire = 43943,73/0,21 = 209256 ft^3

Aire para el soplado de la carga = 209256 ft^3 (6-1)

2.
Primer período de soplado = oxidación del Mn y el Si.

O_2 para el 1° período = 9305,28 + 1842,26 = 11147,54 ft^3

Aire para el 1° período = 11147,54/0,21 = 53083,524 ft^3

t_1 = 53083,524 ft^3/17000 ft^3/min. = 3,1 min.

Tiempo de soplado para el primer período = 3,1 min. (6-2)

Segundo período de soplado = 0xidación del C y del Fe.

O_2 para el 2° período = 14474,88 x2 + 3846,43 = 32796,19 ft^3

Aire para el 2° período = 32796,19/0,21 = 156172,33 ft^3

t_2 = 156172,33/17000 = 9,2 min.

Tiempo de soplado para el segundo período = 9,2 min. (6-2)

3.
Escoria = SiO_2 + MnO + FeO

Composición de la escoria (6-3)

SiO_2 = 725,76 x 60/28	= 1555,2 lbs.	=	40,6%
MnO = 564,48 x 71/55	= 728,7 lbs.	=	19,1%
FeO = 1200 x 72/56	= 1542,8 lbs.	=	40,3%
	3826,7 lbs.	=	100,0%

Gases = CO + CO_2 + N_2

Composición del gas (6-3)

CO = 2 O_2 del C = 14474,88 x 2	= 28949,76 ft^3	= 13,9%
CO_2 = O_2 del C	= 14474,88 ft^3	= 6,9%
N_2 = 209256 x 0,79	= 165312,24 ft^3	= 79,2%
	208736,88 ft^3	= 100,0%

4.
1 m^3 = 35,314 ft^3

Utilizando la fórmula adiabática:

$$W = 3{,}45 V_0 P_0[(P_1/P_0)^{0,29} - 1]$$

$V_0 = 17000 / 35{,}314x60 = 8{,}023\ m^3/seg.$
$P_0 = 14{,}7$ psi. = 1 atm.
$P_1 = P_0 + P$ (manómetro) = 1 + 2 = 3 atm.

$$W = 3{,}45x8{,}023\frac{m^3}{seg.}x1\,\text{atm}\cdot 10333\frac{\text{Kg.}}{\text{m}^2}x\frac{1}{atm.}\left[\left(\frac{3}{1}\right)^{0,29}-1\right]$$

$$=107310{,}59\frac{Kg-m}{seg.}$$

W = 107310,59 / 102x0,8 = 1315 Kw.

Potencia requerida por máquinas de soplado = 1315 Kw. (6-4)

EJERCICIO N°7 (7)

Un convertidor Bessemer ácido sopla 20 toneladas métricas de arrabio a hierro prácticamente puro. El arrabio contenía: 3,6%C; 1,4%Si; 1,0%Mn y 94,0%Fe. La cantidad de hierro oxidado equivale al 2,8% del peso del arrabio.; tres cuartos del carbono pasa a CO y es resto a CO_2.

La presión (manométrica) del soplado es 25000 Kg./m^2. Las máquinas de soplado trabajan a 50 r.p.m. y son de doble acción. El diámetro interno del cilindro es de 1,6 metros y la longitud del émbolo es de 2 metros. El vástago del pistón tiene 15 cm. de diámetro y se extiende a través de ambos extremos del cilindro. La eficiencia mecánica de la máquina es de 92% y la eficiencia de reparto del aire es de 88%.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire, a condiciones normales, necesario para el soplado.
2. El tiempo requerido, por período.
3. El volumen y composición de los gases en cada período.
4. La potencia requerida por las máquinas de soplado.

SOLUCION

1.

Arrabio = 20000 Kg.

C = 20000 x 0,036 = 720
Si = 20000 x 0,014 = 280
Mn = 20000 x 0,010 = 200
Fe = 20000 x 0,94 = 18800

Oxidaciones:

$C \rightarrow CO$ = 724 x ¾ = 540 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 720 – 540 = 180

$C + ½\,O_2 = CO$:	O_2 = 540 x 22,4/24	= 504,0 m^3
$C + O_2 = CO_2$:	O_2 = 180 x 22,4/12	= 336,0
$Mn + ½\,O_2 = MnO$:	O_2 = 200 x 22,4/110	= 40,7
$Si + O_2 = SiO_2$:	O_2 = 280 x 22,4/28	= 224,0
$Fe + ½\,O_2 = FeO$:	O_2 = 20000 x 0,028 x 22,4/112	= 112,0
Total O_2 para oxidaciones		= 1216,7 m^3

Soplo = 1216,7/0,21 = 5793,8 m^3

Volumen total de aire, C.N. = 5793,8 m^3 (7-1)

2.

Debemos encontrar el volumen de aire (O_2) comprimido por minuto, utilizando el coeficiente de reparto porque usamos la longitud del émbolo (Stroke); procedemos así:

Cilindro: diámetro = 1,6 m.; radio = 0,8 m.
Vástago (pistón): diámetro = 0,15 m; radio = 0,075 m.

Radio efectivo = 0,8 – 0,075 = 0,725 m.

Longitud del émbolo (stroke) = 2 m.
r.p.m. = 50; doble acción.= 2

Eficiencia de reparto = 88%
Eficiencia mecánica = 92%

Volumen de aire comprimido = V

$V = \pi (0,8)^2 \times 2 \times 2 \times 50 \times 0,88 = 353,869\ m^3/min.$
$O_2 = 353,869 \times 0,21 = 74,31\ m^3/min.$

O_2 del 1° período sin el de Fe = Si + Mn = 224 + 40,7 = 264,7 m^3
O_2 del 2° período sin el de Fe = C + C = 336 + 504 = 840 m^3
O_2 para oxidación del Fe = 112 m^3

Si asumimos una oxidación uniforme del Fe:

t_1 (sin Fe) = 264,7/74,3 = 3,56 min.
t_2 (sin Fe) = 840/74,3 = 11,30 min.
t total sin Fe = 14,86 min.

t para oxidación del Fe = 112/74,3 = 1,51 min.

t_1 (con Fe) = 3,56 + 1,51 x (3,56/14,86) = 4,0 min
Tiempo de soplado para el 1° período = 4,0 min. (7-2)

t_2 (con Fe) = 11,30 + 1,51 x (11,30/14,86) = 12,5 min.
Tiempo de soplado para el 2° período = 12,5 min. (7-2)

3.
Primer período:

En este período hay oxidación del Si, Mn y algo de Fe, por tanto, el gas estará compuesto solo por N_2.
O_2 del Fe en este período = 112 x 3,56/14,86 = 26,83 m^3.
O_2 total del 1° período = 264,7 + 26,83 = 291,53 m^3

N_2 = 291,83 x 79/21 = 1097 m^3
Volumen y composición del en el 1° período = 1097 m^3 = 100%N_2 (7-3)

Segundo período:

Gas del 2° período = $N_2 + CO + CO_2$

O_2 total de este período = 504 + 336 + 112 x 11,30/14,86 = 925,4 m^3

Volumen y composición del gas del 2° período (7-3)

$N_2 = 925{,}2 \times 79/21$	$= 3480{,}4\ m^3$	$= 72{,}1\%$
$CO = 504 \times 2$	$= 1008{,}0\ m^3$	$= 20{,}9\%$
CO_2	$= 336{,}0\ m^3$	$= 7{,}0\%$
	$4824{,}4\ m^3$	$= 100{,}0\%$

4.
Usamos la expresión adiabática:

$W = 3{,}45 V_0 P_0[(P_1/P_0)^{0{,}29} - 1]$

$$V_0 = \frac{74{,}3}{0{,}21x0{,}88}\frac{m^3}{min.}x\frac{1\ \text{min.}}{60\ \text{seg.}} = 6{,}7\frac{m^3}{seg.}$$

$P_0 = 14{,}7$ psi. = 1 atm. = 10333 Kg./m^2
$P_1 = P_0 + P$ (manómetro) = 1 + 25000/10333 = 3,42 atm.

$$W = 3{,}45x6{,}7\frac{m^3}{seg.}x1\ \text{atm}\ \text{x}\ 10333\frac{\text{Kg.}}{\text{m}^2}\cdot\frac{1}{atm.}\left[\left(\frac{3{,}42}{1}\right)^{0{,}26} - 1\right]$$

$$= 102336{,}11\frac{Kg.m}{seg.}$$

1 Kw = 102 Kg.m/seg.

W = 102336,11 / 102x0,92 = 1090 Kw.

Potencia requerida por máquinas de soplado = 1090 Kw (7-4)

EJERCICIO N°8 (7)

Una carga de 10 toneladas de arrabio en un convertidor produce una escoria con el siguiente análisis: 31,2%FeO; 25,4%MnO y 43,4%SiO_2. La escoria pesó 915 kilogramos, incluyendo 183 Kg. de SiO_2 provenientes del recubrimiento del convertidor.

Los gases del convertidor totalizaron 3190 metros cúbicos, medidos a condiciones normales; y su análisis fue: 16,2%CO; 7,0%CO_2 y 76,8%N_2. El soplo fue alimentado a una presión (manómetro) de 1,8 atmósferas. El tiempo de soplado fue de 12 minutos.

PREGUNTAS

1. La composición del arrabio utilizado en el convertidor.
2. Los metros cúbicos de aire requeridos para el soplado (calculado por el método del oxígeno y el del nitrógeno).
3. Si la temperatura a la cual el volumen del gas dado arriba fue medido, fue de 27°C y el barómetro de 740 mm., en lugar de las condiciones normales; ¿cuánto vapor (kilogramos por metro cúbico de aire), deberían adicionarse al soplo, sin cambiar el tiempo de soplado?
4. La potencia requerida de las máquinas de soplado, asumiendo 88% de eficiencia.

SOLUCION

1.
Arrabio = Fe + Si + Mn + C

SiO_2 en escoria = 915 x 0,434 = 397,11 Kg.
SiO_2 proveniente del arrabio = 397,11 – 183 = 214,11 Kg.
Si en arrabio = 214,11 x 28/60 = 99,82 Kg.

Mn en arrabio = 915 x 0,254 x 55/71 = 180,03 Kg.

C del CO = 3190 x 0,162 x 12/22,4 = 276,85 Kg.
C del CO_2 = 3190 x 0,07 x 12/22,4 = 119,63 Kg.
C del arrabio = 396,48 Kg.

Fe del arrabio = 10000 – 99,92 – 180,03 – 396,48 = 9323,57 Kg.

Composición del arrabio (8-1)

Fe	= 9323,57 Kg.	= 93,23%
Si	= 99,82 Kg.	= 1,00%
Mn	= 180,03 Kg.	= 1,80%
C	= 396,48 Kg.	= 3,97%
	10000,00	100,00%

2.
Método del N_2:

N_2 en gas = N_2 en soplo

N_2 en gas = 3190 x 0,768 = 2449,92 m^3

Soplo = 2449,92/0,79 = 3101 m^3

Aire requerido para el soplado = 3101 m^3 (8-2)

Método del O_2:

$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO$:	O_2 = 915 x 0,312 x 22,4/144	= 44,41 m^3
$Mn + \frac{1}{2} O_2 = MnO$:	O_2 = 180,03 x 22,4/110	= 36,66 m^3
$Si + O_2 = SiO_2$:	O_2 = 99,92 x 22,4/28	= 79,94 m^3
$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$:	O_2 = 3190 x 0,162/2	= 258,39 m^3
$C + O_2 = CO_2$:	O_2 = 3190 x 0,07	= 223,30 m^3
		642,70 m^3

Soplo = 642,70/0,21 = 3060 m^3

Aire requerido para el soplado = 3060 m^3 (8-2)

3.
Consideraciones:

a) Se supone que el aire debe estar húmedo.
b) Si el tiempo de soplado no cambia, debe entrar en el mismo tiempo la misma cantidad de aire, pero húmedo.
c) Como no se propone un porcentaje de saturación del aire, asumimos el 100%.

El cálculo del volumen de aire se hizo a condiciones normales, trabajaremos con condiciones dadas.

A 27°C, la presión máxima de saturación del agua es 26,7 mm.

Cambio de condiciones del aire:

V_1 = 3101 m^3 V_2 =?
P_1 = 760 mm P_2 = 740 mm
T_1 = 273K T_2 = 27 + 273 = 300K
$V_2 = V_1 \times (P_1/T_1) \times (T_2/P_2)$ = 3500 m^3

Volumen de H_2O = 3500 x 26,7/740 = 126,3 m^3.

Peso en Kg. = Vol. (m^3) x (peso molecular/2) x 0,09.

Peso del H_2O = 126,3 x 0,09 x 18/2 = 102,3 Kg.

Aire seco = 3500 – 126,3 = 3373,7 m^3

$H_2O = 102{,}3/3373{,}7 = 0{,}03$

H_2O = 0,03 Kg./m³ de aire (8-3)

4.
Utilizando la fórmula adiabática:

$W = 3{,}45\ V_0P_0[(P_1/P_0)^{0{,}29} - 1]$

$V_0 = 3101 / 12x60 = 4{,}31\ m^3/seg.$
$P_0 = 14{,}7$ psi. = 1 atm.
$P_1 = 1 + 1{,}8 = 2{,}8$ atm.
Eficiencia = 88%

$W = 3{,}45 \times 10333 \times [(2{,}8)^{0{,}29} - 1] = 53462{,}3$ Kg·m/seg.

Potencia requerida por las máquinas de soplado = 53462,3/102x0,88 = 596 Kw.
Potencia requerida por las máquinas de soplado = 596 Kw. (8-4)

EJERCICIO N°9 (7)

Un convertidor Bessemer básico procesa 20 toneladas cortas del siguiente arrabio:

C	3,05%	S	0,33%
Mn	0,41	P	1,37
Si	0,83	Fe	94,01

Al final del soplado el baño contiene: 0,17%C; 0,10%Mn; 0,055%S; 0,06%P; 0%Si y totaliza 37000 libras.

El carbono forma CO y CO_2 en la proporción de 4:1. Asumir que la oxidación del hierro ocurre los períodos segundo y tercero, y está dividida entre ellos en proporción a su duración. El azufre es removido completamente como CaS, los gases no contienenO_2 ni SO_2.

Durante el soplado se corroen 1200libras de dolomita calcinada del revestimiento (asumir CaO·MgO); y en adición, se adiciona suficiente CaO puro para producir una escoria con 67%CaO.

Las máquinas de soplado suministran aire a 26 psi de presión (manómetro), con un coeficiente de reparto de 94% y una eficiencia mecánica de 92%.

Las máquinas son de doble acción, 90 r.p.m., diámetro interno del cilindro de 3,6 ft., longitud del émbolo, 6,6 ft. El vástago (a través de ambos lados) tiene 6 pulgadas de diámetro.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado para el soplado.
2. El tiempo de cada período de soplado.
3. El porcentaje de eliminación de las impurezas y el porcentaje de pérdida del Fe.
4. El peso de la cal adicionada y de escoria producida.
5. La potencia requerida para poner en marcha las máquinas de soplado, haciendo el cálculo por el método del diagrama teórico indicador.

SOLUCION

1.
Arrabio = 20 x 2000 = 40000 libras.

C = 40000 x 0,0305 = 1220
Mn = 40000 x 0,0041 = 164
Si = 40000 x 0,0083 = 332
S = 40000 x 0,0033 = 132
P = 40000 x 0,0137 = 548
Fe = 40000 x 0,9401 = 37604

Baño final = 37000 libras

C = 37000 x 0,0017 = 62,9
Mn = 37000 x 0,0010 = 37,0
S = 37000 x 0,00055 = 20,35
P = 37000 x 0,0006 = 22,2
Fe = 37000 x 0,99615 = 36857,55

Elementos oxidados (libras):

C oxidado = 1220 – 62,9 = 1157,1
$C \rightarrow CO$ = 1157,1 x 4/5 = 925,68
$C \rightarrow CO_2$ = 1157,1 x 1/5 = 231,42
$Mn \rightarrow MnO$ = 164 – 37 = 127
$Si \rightarrow SiO_2$ = 332
$P \rightarrow P_2O_5$ = 548 – 22,2 = 525,8
$Fe \rightarrow FeO$ = 37604 – 36857,55 = 746,45

Reacciones de oxidación:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$:	O_2 = 925,68 x 359/24	= 13846,63 ft^3
$C + O_2 = CO_2$:	O_2 = 231,42 x 359/12	= 6923,32
$Mn + \frac{1}{2} O_2 = MnO$:	O_2 = 127 x 359/110	= 414,48
$Si + O_2 = SiO_2$:	O_2 = 332 x 359/28	= 4256,71
$2P + 5/2\, O_2 = P_2O_5$:	O_2 = 525,8 x 359 x 2,5 / 62	= 7611,38
$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO$:	O_2 = 746,45 x 359/112	= 2392,64
	O_2 de oxidaciones	= 35445,16 ft^3

$S \rightarrow CaS$ = 132 – 20,35 = 111,65 lbs.
Ca para este = 111,65 x 40/32 = 139,6 lbs.
O de este = 139,6 x 16/40 = 55,825 lbs.
O_2 aportado por el CaO = 55,825 x 359/32 = 626,3 ft^3

O_2 del soplo = 35445,16 – 626,3 = 34818,9 ft^3

Aire utilizado para el soplado = 34818,9/0,21 = 165804,3 ft^3

Aire utilizado para el soplado = 165804,3 ft^3 (9-1)

2.

Para este cálculo se debe determinar primero el caudal de aire.

El volumen de aire también puede calcularse a partir de las dimensiones del cilindro y del recorrido del émbolo por minuto. Si se conocen la longitud y el diámetro del cilindro, se puede calcular su volumen, sin embargo, a este cálculo hay que hacerle una corrección debido al espacio ocupado por el vástago o el pistón. El volumen multiplicado por las revoluciones por minuto de la máquina, y por 2 si es de doble acción; da como resultado el volumen de aire comprimido por minuto.

Coeficiente de reparto = 94%
r.p.m. = 90
Doble acción = 2
Cilindro: diámetro = 3,6 ft; radio = 1,8 ft
Longitud del émbolo (stroke) = 6,6 ft.
Vástago o pistón: diámetro = 6 pulgadas; radio = 3 pulgadas = 0,25 ft.

Area del vástago = $\pi r^2 = \pi \cdot (0,25)^2 = 0,196$ ft^2
Area del cilindro = $\pi \cdot (1,8)^2 = 10,179$ ft^2

Corrección (área efectiva) = 10,179 – 0,196 = 9,983 ft^2

Volumen efectivo = 9,983 x 6,6 = 65,8878 ft^3

Aire comprimido = caudal de aire = 65,8878 x 2 x 90 x 0,94 = 11148 ft^3/min.

Caudal de O_2 = 11148 x 0,21 = 2341,08 ft^3/min.

Cálculo del tiempo de los períodos:

1° período = oxidación del Mn y el Si.

t_1 = (414,48 + 4256.71) ft^3 / 2341,08 ft^3/min. = 1,995 ≅ 2,0 min.
Tiempo del 1° período = 2,0 min. (9-2)

Para el 2° y 3° períodos, procedemos así:

2° período = descarburación = oxidación del C y algo de Fe.

t_2 sin oxidación de Fe = (13846,63 + 6923,32) / 2341,08 = 8,87 min.

3° período = desfosforación = oxidación del P y algo de Fe.

t_3 sin oxidación de Fe = 7611,38 / 2341,08 = 3,25 min
$t_2 + t_3$ sin oxidación de Fe = 12,12 min.

t (Fe) = 2392,64 / 2341,08 = 1,02 min.

t_2 con oxidación de Fe = 8,87 + 1,02 x (8,87/12,12) = 9,62 min.
Tiempo del 2° período = 9,62 min. (9-2)

t_3 con oxidación de Fe = 3,25 + 1,02 x (3,25/12,12) = 3,52 min.
Tiempo del 3° período = 3,52 min. (9-2)

3.
Mn eliminado = 127/164 = 0,774
Mn eliminado = 77,4% (9-3)

Si eliminado = 100% (9-3)

C eliminado = 1157,1/1220 = 0,948
C eliminado = 94,8% (9-3)

S eliminado = 111,65/132 = 0,846
S eliminado = 84,6% (9-3)

P eliminado = 525,8/548 = 0,959
P eliminado = 95,9% (9-3)

Pérdida de Fe = 746,45/37604 = 0,02
Pérdida de Fe = 2,0% (9-3)

4.
Escoria = MnO + SiO_2 + P_2O_5 + FeO + CaO + CaS + MgO

Escoria sin CaO = 100 – 67 = 33%

$MnO = 127 \times 71/55 = 163,9$ lbs.
$SiO_2 = 332 \times 60/28 = 711,4$
$P_2O_5 = 525,8 \times 142/62 = 1204,3$
$FeO = 746,45 \times 72/56 = 959,7$
$CaS = 111,65 \times 72/32 = 251,2$
$MgO = 1200 \times 40/96 = \underline{500,0}$
Escoria sin CaO $= 3790,5$ lbs.

Peso de la escoria = 3790,5/0,33 = 11486,4 lbs.
Peso de la escoria = 11486,4 lbs. (9-4)

CaO en escoria = 11486,4 x 0,67 = 7696 lbs.
CaO de dolomita = 1200 – 500 = 700 lbs.
CaO para formar CaS = 139,6 x 56/40 = 195,44 lbs.

CaO adicionado = 7696 + 195,44 – 700 = 7191,44 lbs.
CaO adicionado = 7191,44 lbs. (9-4)

5.
Hay que observar la Fig. #1.

1 Kw = 1,341 H.P
$1\ m^3 = 35,314\ ft^3$

V_0 = caudal = 11148 ft^3/min. = 5,261 m^3/seg.
P_0 = 14,7 psi.
$P_1 = P_0 + P$ (manómetro) = 14,7 + 26 = 40,7 psi.

La presión P_1 se alcanza cuando la base del rectángulo (xD) es = 14,7/40,7 y la del triángulo (Ax) es = 26/40,7. La altura de c/u de ellos es $= P_1 - P_0 = 26$.

Area del rectángulo = 26 x (14,7/40,7) = 9,39
Area del triángulo = ½ x26 x (26/40,7) = $\underline{8,30}$
Area total = 17,69 psi. = 17,69/14,7 = 1,204 atm.

$$\text{Potencia} = 5,261\frac{m^3}{seg.} x 1,204\ atm. x 10333\frac{Kg.}{m^2} x \frac{1}{atm.}$$

$$= 65452\frac{Kg \cdot m}{seg.}$$

Potencia = 65452 / 102x0,92 = 697,5 Kw.

Potencia = 697,6 x 1,341 = 935,3 H.P
Potencia requerida para máquinas de soplado = 935,3 H.P (9-5)

EJERCICIO Nº10 (7)

Un convertidor bessemer básico procesa 15 toneladas de un arrabio que contiene:

C 3,6%
Mn 0,9
Si 0,7
P 2,2

Se oxidan también Fe equivalente al 3,6% del peso del arrabio, siendo uniformemente distribuido a través del soplado. Tres cuartos del carbono pasan a CO y el resto a CO_2. Se adiciona suficiente lima (CaO) como para producir una escoria con 10%SiO_2.

La presión de soplado es de 1,7 atmósferas (manómetro). Las máquinas de soplado trabajan a 90 r.p.m.

El diámetro interno del cilindro es de 1,0 m; la longitud o carrera del émbolo (stroke) es de 2 m. La máquina es de doble acción. El vástago o pistón (a través de ambos lados) tiene un diámetro de 15 cm.

La eficiencia mecánica de la máquina es de 92% y el coeficiente de reparto del aire es del 88%.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado para el soplado, a condiciones normales.
2. El tiempo de soplado, por período.
3. El peso de la lima adicionada.
4. La potencia requerida por las máquinas de soplado.
5. El tiempo total de soplado si se introducen en el soplo 0,02 Kilogramos de vapor, por metro cúbico de aire, para limitar la elevación de temperatura en el convertidor.

SOLUCION

1.

Arrabio = 15 x 1000 = 15000 Kg.

C = 0,036 x 15000 = 540
Mn = 0,009 x 15000 = 135
Si = 0,007 x 15000 = 105
P = 0,022 x 15000 = 330
Fe = 0,926 x 15000 = 13890

C → CO = 540 x ¾ = 405 Kg.
C → CO_2 = 540 x ¼ = 135 Kg.
Fe → FeO = 15000 x 0,036 = 540 Kg.

Oxidaciones:

Se asume que se oxidan todas las impurezas:

$C + ½ O_2 = CO$: O_2 = 405 x 22,4/24 = 378,0 m^3
$C + O_2 = CO_2$: O_2 = 135 x 22,4/12 = 252,0
$Mn + ½ O_2 = MnO$: O_2 = 135 x 22,4/110 = 27,7
$Si + O_2 = SiO_2$: O_2 = 105 x 22,4/28 = 84,0
$2P + 2,5 O_2 = P_2O_5$: O_2 = 330 x 2,5 x 22,4 / 2x31 = 298,1
$Fe + ½ O_2 = FeO$: O_2 = 540 x 22,4/112 = 108,0
O_2 de reacciones de oxidación = 1147,6 m^3

Aire = 1147,6/0,21 = 5464,8 m^3

Aire utilizado para el soplado = 5464,8 m^3 (10-1)

2.

Hay que determinar primero el caudal.

Presión manométrica (gage) = 1,7 atm.
r.p.m. = 90
Diámetro del cilindro = 1,0 m., radio = 0,5 m.
Carrera del émbolo (stroke) = 2,0 m.
Doble acción = 2
Diámetro del vástago = 15 cm. = 0,15 m., radio = 0,075 m.
Eficiencia = 92%

Coeficiente de reparto = 88%.

Para este cálculo son válidas las observaciones que se hicieron en el punto 2 del ejercicio #9.
Basta recordar que el volumen multiplicado por lar r.p.m. de la máquina y por 2 si es de doble acción, da como resultado el volumen de aire comprimido por minuto.

Area del cilindro = $\pi r^2 = \pi \cdot (0,5)^2 = 0,785\ m^2$.
Area del vástago (pistón) = $\pi \cdot (0,075)^2 = 0,0177\ m^2$

Volumen corregido = 2 x (0,785 – 0,0177) = 1,535 m^3

Volumen de aire comprimido = caudal = 1,535 x 90 x 2 x 0,88 = 243,1 m^3/min.
Caudal de O_2 = 243,1 x 0,21 = 51,07 m^3/min.

Cálculo de los tiempos por período:

1° período = desiliciación (oxidación de Si, Mn y algo de Fe).
t_1 sin Fe = (27,5 + 84)/51,07 = 2,18 min.

2° período = descarburación (oxidación del C y algo de Fe)
t_2 sin Fe = (378 + 252)/51,07 = 12,34 min.

3° período = desfosforación (oxidación del P y algo de Fe).
t_3 sin Fe = 298,1/51,07 = 5,84 min.
Tiempo total sin Fe = 20,36 min.

Tiempo de oxidación del Fe = 108/51,07 = 2,11 min.

Tiempo de soplado por período (10-2)

1° período = 2,18 + 2,11 x (2,18/20,36) = 2,4 min.
2° período = 12,34 + 2,11 x (12,34/20,36) = 13,6 min.
3° período = 5,84 + 2,11 x (5,84/20,36) = 6,4 min.
Tiempo total de soplado = 22,4 min.

3.
Escoria = $SiO_2 + MnO + P_2O_5 + FeO + CaO$

SiO_2 = 105 x 60/28 = 225,0 Kg.
MnO = 135 x 71/55 = 174,3
P_2O_5 = 330 x 142/62 = 755,8
FeO = 540 x 72/56 = 694,3

Escoria total = 225/0,1 = 2250 Kg.

CaO = 2250 – 225 – 174,3 – 755,8 – 694,3 = 400,6 Kg.
CaO adicionado = 400,6 Kg. (10-3)

4.
Utilizando el método adiabático:

$W = 3,45\ V_0 P_0[(P_1/P_0)^{0,29} - 1]$

$$V_0 = 243,2\frac{m^3}{min.} x \frac{1\text{ min.}}{60\text{ seg.}} x \frac{1}{0,88} = 4,602\frac{m^3}{seg.}$$

P_0 = 14,7 psi. = 1 atm.
$P_1 = P_0$ + P (gage) = 1 + 1,7 = 2,7 atm.

$$W = 3{,}45x4{,}602\frac{m^3}{seg.}x1\,\text{atm.}x10333\frac{\text{Kg.}}{\text{m}^2}x\frac{1}{atm.}\left[(2{,}7)^{0{,}29}-1\right]$$

$$= 54764{,}3\frac{Kg.\cdot m}{seg.}$$

W = 54764,3/102x0,92 = 584 Kw.

Potencia requerida por las máquinas de soplado = 584 Kw. (10-4)

5.

Soplo = 5464,8 m^3

Vapor de H_2O = 5464,8 x 0,02 = 109,3 Kg. = 136 m^3

Aire seco necesario = 5464,8 – 136 = 5328,8 m^3

El caudal de H_2O será = 243,2 x 0,02 x 22,4/18 = 6,05 m^3/min.

Caudal total = 243,2 + 6,05 = 249,3 m^3/min.

Tiempo total de soplado = 5328,8/249,3 = 21,4 min.

Tiempo total de soplado = 21,4 min. (10-5)

EJERCICIO N°11 (7)

El gas producido en un productor de gas tiene el siguiente análisis:

CO	27%
CO_2	3
CH_4	2
H_2	6
N_2	62

Este gas es quemado en un horno, con 20% de aire en exceso. Los productos de combustión salen del horno a 377°C. Y la chimenea a 327°C. Temperatura atmosférica, - 10°C; barómetro, 765 mm. El gas es quemado a una rata de 1 metro cúbico por segundo. La chimenea tiene un diámetro uniforme de 1 metro y una altura de 20 metros.

PREGUNTAS

1. La velocidad de los productos de combustión, en el fondo y en la parte alta de la chimenea.
2. El poder de levantamiento total (lifting power) de los gases en la chimenea, en kilogramos.
3. El tiro (corriente de aire = chimney draft) de la chimenea, en centímetros y en pulgadas de agua.
4. La diferencia total de nivel de la columna de gas (total head) de la chimenea, en metros y en pies de aire a condiciones normales.
5. La eficiencia termomecánica de la chimenea.

SOLUCION

1.

Para este cálculo, es necesario determinar el volumen de los productos de combustión resultantes de quemar 1 m^3 de gas:

Reacciones	Productos de combustión (m^3/m^3 de gas)			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2
$CO + ½ O_2 = CO_2$	0,135	0,27	---	0,508
CO_2	---	0,03	---	---
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,040	0,02	0,04	0,150
$H_2 + ½ O_2 = H_2O$	0,030	---	0,06	0,113
N_2	---	---	---	0,620
Totales	0,205	0,32	0,10	1.391

Aire teórico = 0,205/0,21 = 0,976 m^3
Aire total O 0,976 x 1,2 = 1,1712 m^3
Aire exceso = 1,1712 – 0,976 = 0,1952 m^3

O_2 en exceso = 0,1972 x 0,21 = 0,041 m^3

N_2 total = 1,1712 x 0,79 + 0,62 = 1,5452 m^3

Volumen y composición de los productos de combustión:
O_2 = 0,0410 m^3 = 2,04%
CO_2 = 0,3200 = 15,95%
H_2O = 0,1000 = 4,99%
N_2 = 1,5452 = 77,02%
2,0062 m^3

Estos productos de combustión se encuentran a condiciones normales y como son productos de la combustión de 1 m^3 de gas/seg., su caudal será = 2.0062 m^3/seg.

Cambio de condiciones:

V_1 = 2,0062 m^3/seg.	V_2 =?
P_1 = 760 mm	P_2 = 765 mm
T_1 = 273K	T_2 = 377 + 273 = 650K

$V_2 = V_1 \times (P_1/T_1) \times (T_2/P_2)$ = 4,745 m^3/seg. (esto sucede en el fondo de la chimenea).

Para el tope de la chimenea:

V_2 = 2,0062 x (760/765) x (600/273) = 4,380 m^3/seg.

Volumen por unidad de tiempo = área x velocidad ∴

$$Velocidad = \frac{Volumen / tiempo}{Area}$$

Area de la chimenea = $\pi \cdot (0,5)^2 = 0,785\ m^2$ ∴

Velocidad en el fondo = 4,745/0,785 = 6,04 m/seg.

Velocidad de los P.C en el fondo de la chimenea = 6,04 m/seg. (11-1)

Velocidad en el tope = 4,380/0,785 = 5,58 m/seg.

Velocidad de los P.C. en el tope de la chimenea = 5,58 m/seg. (11-1)

2.

El tiro o corriente natural de gas (draft) en debido a la diferencia en peso entre una columna de gas en la chimenea y una columna igual de aire exterior. La columna de gas en la chimenea y la columna exterior de aire de igual altura y sección transversal, se puede asumir que ocupan los dos lados de un tubo en "U"; el lado más frío y por tanto el más pesado, empuja al más ligero o liviano hacia arriba, con una fuerza igual a la diferencia en peso entre las dos columnas. Esta diferencia en peso es lo que se denomina *poder de levantamiento o ascensional* (lifting power) del gas.

Determinamos el peso de 1 m^3 de productos de combustión.

O_2 = 0,0204 x 32/22,4 = 0,0291 Kg.
CO_2 = 0,1595 x 44/22,4 = 0,3133
H_2O = 0,0499 x 18/22,4 = 0,0401
N_2 = 0,7702 x 28/22,4 = 0,9627
Peso de 1 m^3 de P.C = 1,3452 Kg.

A condiciones normales:

Volumen de una columna de gas en chimenea = $\pi \cdot (0,5)^2 \times 20 = 15,708$ m^3

Temperatura promedio en la chimenea = ½ x (377 + 327) = 352°C = 625K.

Llevamos este volumen a C.N:

Volumen del gas = 15,708 x (273/625)x (765/760) = 6,906 m^3

Peso de este = 6,906 m^3 x 1,3452 Kg./m^3 = 9,29 Kg.

Si asumimos el mismo volumen pero para una columna de aire seco, a las condiciones dadas, tendríamos:

$T_2 = 273 - 10 = 263$K

Volumen del aire = 15,708 x (273/263) x (765/760) = 16,41 m^3

Densidad del aire = 1,293

Peso del aire = 16,41 x 1,293 = 21,22 Kg.

Poder de levantamiento = 21,22 – 9,29 = 11,93 Kg.

Poder de levantamiento = 11,93 Kg. (11-2)

3.
1 atm. = 760 mm = 33,9 pies de agua = 10333 Kg./m^2

$$\text{Tiro (corriente de aire)} = \frac{\text{Poder de lavantamiento}}{\text{Area de la chimenea}}$$

Area de la chimenea = $\pi \cdot (0,5)^2 = 0,785$ m^2

Tiro (draft) = 11,93 / 0,785 = 15,20 Kg./m^2

$$Tiro = 15,2\frac{Kg.}{m^2}x\frac{33,9\text{ ft. de H}_2O}{10333\,{}^{Kg.}/_{m^2}}x\frac{12\text{ in}}{1\text{ ft.}}x\frac{2,54\text{ cm}}{1\text{ in.}} = 1,52$$

Tiro (draft) = 1,52 cm de H_2O (11-3)

Tiro = 1,52 cm. x 1 in./2,54 cm. = 0,60

Tiro (draft) = 0,60 in. de H_2O (11-3)

4.

Puesto que una presión por unidad de área se puede expresar como la altura de una columna de líquido, el tiro de una chimenea es equivalente a su diferencia de nivel (chimney head); siendo esta la altura de una columna de líquido (o gas) igual a una presión dada. En el caso del sistema chimenea-gas, la diferencia de nivel (head) se expresa en pies o metros de agua, a condiciones normales.

1 pies de aire = 12 x 0,001293 = 0,015516 pulgadas de agua.

Si tomamos el tiro ya calculado tendremos:

Diferencia total de nivel (total head) = 0,60/0,015516 = 38,66

Diferencia total de nivel = 38,7 ft. de aire (11-4)

$$\text{Diferencia total de nivel} = 38{,}66\,\text{ft.de aire}\cdot\frac{12\,\text{in.}}{1\,\text{ft}}\cdot\frac{2{,}54\,\text{cm}}{1\,\text{in}}\cdot\frac{1\,\text{m}}{100\,\text{cm}}$$

$$= 11{,}75\,\text{m de } H_2O$$

Diferencia total de nivel = 11,75 m. de H_2O (11-4)

5.

Para encontrar la rata de trabajo o potencia de la chimenea, procedemos así:

Caudal promedio del gas en la chimenea = ½ x (4,745 + 4,380) = 4,5625 m^3/seg.

Peso del gas = 9,29 (ya calculado).

Area de la chimenea = $\pi \cdot (0{,}5)^2 = 0{,}785\ m^2$

Potencia de la chimenea = (caudal x peso) / área

$$= 4{,}5625\frac{m^3}{seg}\,x\,\frac{9{,}29\,\text{Kg.}}{0{,}785\,\text{m}^2} = 54\frac{Kg.m}{seg.}$$

1 Kw = 102 Kg.m/seg.

Potencia de la chimenea = 54/102 = 0,53 Kw.

Comparamos esto con el contenido de calor de los gases:

Los gases se encuentran a C.N con un V = 2,0062 m^3/seg, y los vamos a llevar a la temperatura promedio de 352°C, así:

$O_2 + N_2 = 0{,}7702 + 0{,}0204 = 0{,}7906$

$O_2 + N_2 = 0{,}7906 \times (0{,}302 + 2{,}2\times10^{-5}\,t)\cdot t$ =
$H_2O = 0{,}0499 \times (0{,}373 + 5{,}0\times10^{-5}\,t)\cdot t$ =
$CO_2 = 0{,}1595 \times (0{,}406 + 9{,}0\times10^{-5}\,t)\cdot t$ = ____________________
Contenido de calor en los gases a cualquier "t" = $0{,}3221\,t + 3{,}4243\times10^{-5}\,t^2$

Si t = 352°C; contenido de calor = 117,6 Kcal./m^3

Contenido de calor = 117,6 Kcal./m^3 x 2,0062 m^3/seg. = 235,2 Kcal./seg.
= 846720 Kcal./hr.

1 Kw = 860 Kcal./hr.

Potencia del gas = 846720/860 = 984,6 Kw.

Eficiencia termomecánica de la chimenea = 0,53/984,6 = 0,00054

Eficiencia termomecánica de la chimenea = 0,054% (11-5)

EJERCICIO N°12 (7)

El gas obtenido de un productor de gas, fue quemado a la rata de 1 metro cúbico por segundo con 10% de aire en exceso, ambos, el aire y el gas fueron precalentados a 1000°C, produciendo por metro cúbico de gas quemado, un producto de combustión que contenía: 0,31 m^3 de CO_2; 0,18 m^3 de H_2O; 0,02 m^3 de O_2 y 1,44 m^3 de N_2. La intensidad calórica (temperatura de la llama) fue de 2090°C. La potencia calorífica del gas fue de 1145 Kcal./m^3. El contenido de calor en el gas precalentado fue de 358 Kcal. y en el aire de 365 Kcal.

Las medidas de temperatura en el horno, presentaron los siguientes resultados:

Al final de la llama (cerca de los quemadores), 1900°C.

Al final del cañón de la chimenea (entrada a los recuperadores), 1650°C.

Dejando los recuperadores y entrando a la caldera para pérdidas de calor, 750°C.

Dejando la caldera y entrando a la chimenea, 350°C.

Saliendo de la chimenea, 250°C.

La chimenea tenía 50 metros de altura y una sección transversal uniforme de 1 m^2. La velocidad de los gases en la chimenea fue de 5 m/seg.

PREGUNTAS

1. El porcentaje del calor total que entra al horno, que es:
   a) Perdido en la combustión.
   b) Utilizado en el horno.
   c) Extraído en los recuperadores.
   d) Extraído en la caldera.
   e) Perdido en la chimenea.
2. La eficiencia de los recuperadores.
3. El porcentaje del calor que entra a los recuperadores que es retenido en ellos.
4. El tiro (draft) en la chimenea, en milímetros de mercurio.
5. La eficiencia termomecánica de la chimenea.

SOLUCION

1.

El calor total está representado por la potencia calorífica del combustible + precalentamiento del aire + precalentamiento del combustible.

Calor total = 1145 + 358 + 365 = 1868 Kcal. / m^3 de combustible.

Vamos a determinar el contenido de calor de los productos de combustión, a cualquier temperatura:

$$N_2 + O_2 = 1{,}46 \times (0{,}302 + 2{,}2\times10^{-5}\, t)\cdot t = 0{,}441\, t + 3{,}212\times10^{-5}\, t^2$$
$$CO_2 = 0{,}31 \times (0{,}406 + 9{,}0\times10^{-5}\, t)\cdot t = 0{,}126\, t + 2{,}790\times10^{-5}\, t^2$$
$$H_2O = 0{,}18 \times (0{,}373 + 5{,}0\times10^{-5}\, t)\cdot t = \underline{0{,}067\, t + 9{,}000\times10^{-6}\, t^2}$$
$$0{,}634\, t + 6{,}902\times10^{-5}\, t^2$$

Contenido de calor cuando:

t = 1900°C: contenido de calor = 1453,8 Kcal.
t = 1650°C: contenido de calor = 1234,0
t = 750°C : contenido de calor = 514,3
t = 350°C : contenido de calor = 230,4
t = 250°C : contenido de calor = 162,8

a) Calor perdido en la combustión = (1868 – 1453,8) / 1868 = 0,222

a) Calor perdido en la combustión = 22,2% (12-1.a)

b) Calor utilizado en el horno = (1453,8 – 1234,0) / 1868 = 0,118
b) calor utilizado en el horno = 11,8% (12-1.b)

c) Calor extraído en los recuperadores = (1234 – 514,3) / 1868 = 0,385
Calor extraído en los recuperadores = 38,5% (12-1.c)

d) Calor extraído en la caldera = (514,3 – 230,4) / 1868 = 0,152
Calor extraído en la caldera = 15,2% (12-1.d)

e) Calor perdido en la chimenea = 230,4 / 1868 = 0,123
Calor perdido en la chimenea = 12,3% (12-1.e)

2.
Calor que entra a los recuperadores = 1234,0 Kcal.
Calor que sale de los recuperadores = 514,3 Kcal.

Eficiencia de los recuperadores = (1234 – 514,3) / 1234 = 0,583
Eficiencia de los recuperadores = 58,3% (12-2)

3.
Calor retenido en los recuperadores = (1234 – 514,3) / 1234 = 0,583
Calor retenido en los recuperadores = 58,3% (12-3)

4.
Debido a que una presión por unidad de área puede ser expresada como la altura de una columna de líquido, el tiro de una chimenea es equivalente a su diferencia de nivel; siendo esta igual a la altura de una columna de líquido o gas igual a una presión dada.
Si esta altura la expresamos en unidades de presión, tendremos:

Determinación del peso de 1 m^3 de gas:

CO_2 = 0,31 m^3 = 15,9%
H_2O = 0,18 m^3 = 9,2%
O_2 = 0,02 m^3 = 1,0%
N_2 = 1,44 m^3 = 73,9%
1,95 m^3 = 100,0%

Si asumimos 1 m^3 de este gas:

CO_2 = 0,159 x 44/22,4 = 0,3123 Kg.
H_2O = 0,092 x 18/22,4 = 0,0739 Kg.
O_2 = 0,010 x 32/22,4 = 0,0143 Kg.
N_2 = 0,739 x 28/22,4 = 0,9238 Kg.
1,3243 Kg.

1 m^3 de este gas pesa 1,3243 Kg.

La altura de la columna es = 50 m.
Sección transversal = 1 m^2
Temperatura promedio en la chimenea = ½ (350 + 250) = 300°C = 573K
Volumen del gas en la columna = 1 x 50 = 50 m^3

Expresado en C.N:

Peso del gas = 50 x (273/573) x 1,3243 = 31,55 Kg.

Presión = 31,55 Kg. / 1 m^2 = 31,55 Kg./m^2

760 mm de presión = 10333 Kg./m^2

Tiro = 31,55 x (760/10333) = 2,32

Tiro en la chimenea = 2,32 mm, Hg. (12-4)

5.

Temperatura promedio en la chimenea = 300ºC

Contenido de calor de los P.C a esta temperatura = ½ ·(230,4 + 162,8) = 196,6 Kcal./seg.
= 196,6 x 3600 = 707760 Kcal./hr.

Potencia = 707760 / 860 = 823 Kw.

Tiro = 31,55 Kg./m^2

Flujo = 5 (m/seg) x 1 m^2 = 5 m^3/seg.

Trabajo realizado = 31,55 (Kg./m^2) x 5 (m^3/seg.) = 157,75 kg.·m/seg.

1 Kw = 102 Kg.·m/seg.

Potencia = 157,75 / 102 = 1,55 Kw.

Eficiencia termomecánica = 1,55/823 = 0,00188

Eficiencia termomecánica en la chimenea = 0,188% (12-5)

CAPITULO X

BALANCE DE CALOR

EJERCICIO N°1 (9)

Al efectuar un proceso determinado, se suministran a un sistema 500 BTU de calor y el sistema aumenta su volumen en 4 pies cúbicos.

La presión en el sistema es constante e igual a 1 atmósfera.

PREGUNTAS

1. Calcular el trabajo realizado, el libras-pié.
2. El cambio de calor a presión constante.
3. El cambio de calor a volumen constante.

SOLUCION

1.

El trabajo presión – volumen se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W = P\Delta V \qquad (1)$$

Donde:
W = trabajo
P = presión
ΔV = cambio en volumen.

Vamos a llevar el cambio de volumen a litros:

1 m^3 = 1000 lts. = 35,314 ft^3.
1 litro = 35,314/1000 = 3,5314 x 10^{-2} ft^3

$$W = 1\,\text{atm}x4\,\text{ft}^3 \frac{1\,\text{lts}}{3{,}5314\text{x}10^{-2}\,ft^3} = 113{,}27\,\text{lts - am.}$$

1 caloría = 3,091 libra-pié

$$W = 113{,}27\,\text{lts - atm}\frac{1{,}987\,\text{cal}}{0{,}082\,\text{lts - atm.}} x \frac{3{,}091\,\text{lbs - ft}}{1\,\text{cal.}} = 8483{,}91\,\text{lb - ft.}$$

Trabajo = 8483,91 lb-ft (1-1)

2.

Si q = calor:

ΔH = cambio de entalpía = q, cuando el proceso se realiza a presión constante como es este caso, por tanto:

ΔH = q = 500 BTU

Cambio de calor a presión constante = 500 BTU (1-2)

3.

El cambio de calor a volumen constante, se determina en base a la Primera Ley de la Termodinámica, que se expresa de la manera siguiente:

$$\Delta U = q - W \qquad (2)$$

Donde:
ΔU = cambio de calor a volumen constante = energía interna del sistema.

1 caloría = 3,968x10^{-3} BTU

$$W = 8483{,}91\,\text{lb - ft}\,\frac{1\,\text{cal.}}{3{,}091\,\text{lb - ft}}\,x\,\frac{3{,}968x10^{-3}\,BTU}{1\,\text{cal.}} = 10{,}89\,\text{BTU}$$

$\Delta U = 500 - 10{,}89 = 489{,}11$ BTU

ΔU = cambio de calor a volumen constante = 489,11 BTU (1-3)

EJERCICIO N°2 (9)

Un motor de corriente continua opera regularmente a 115 voltios y 25 amperios, y proporciona 3,2 H.P a través de su eje.

PREGUNTAS

1. ¿Cuánto calor es disipado por el motor a sus alrededores, en BTU por hora?.

SOLUCION

1.

Trabajo eléctrico es el que se realiza por el paso de una corriente eléctrica; en un circuito de corriente continua simple, se mide por el producto del voltaje por la corriente.

W (eléctrico) = I x V = 25 x 115 = 2875 watts. = 2,875 Kw.

1 Kw = 1,341 H.P
1 H.P = 42,44 BTU/min. = 42,44 x 60 = 2546,4 BTU/hr.

$$W(eléctrico) = 2{,}875\,\text{Kw}\cdot\frac{1{,}341\,\text{H.P}}{\text{Kw}}\,x\,\frac{2546{,}4}{H.P}\,\frac{BTU}{hr} = 9817{,}33\,\text{BTU/hr.}$$

$$W\ \text{proporcionado a través del eje} = 3{,}2\,\text{H.P}\cdot\frac{2546{,}4}{\text{H.P}}\,\frac{BTU}{hr}$$

$$= 8148{,}48\,\frac{BTU}{hr}$$

Calor disipado = 9817,33 – 8148,48 = 1668,85 BTU/hr.

Calor disipado = 1668,85 BTU/hr. (2-1)

EJERCICIO N°3 (9)

15000 pies cúbicos por minuto de gases productos de combustión que analizaron: 74%N_2, 14%CO_2, 10%H_2 y 2%O_2; pasa por una caldera para calor residual que los enfría desde 2050°F a 560°F.

PREGUNTAS

1. Calcular los caballos ingleses (B.H.P) equivalentes al calor liberado por estos productos de combustión en la caldera.

SOLUCION

1.

2050°F = 5/9 x (2050 – 32) = 1121,11°C
560°F = 5/9 x (560 – 32) = 293,33°C.

1 caballo caldera = 140,7 Kcal./min.
1 m^3 = 35,314 ft^3

Productos de combustión = 15000 / 35,314 = 424,76 m^3/min.

N_2 = 424,76 x 0,74 = 314,32 m^3/min.
CO_2 = 424,76 x 0,14 = 59,47
H_2 = 424,76 x 0,10 = 42,48
O_2 = 424,76 x 0,02 = 8,50

Contenido de calor de los productos de combustión a 1121,11°C:

$N_2 + O_2$ = 322,82 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 1121,11) x 1121,11 = 118225 Kcal./min.
CO_2 = 59,47 x (0,406 + 9,0x10^{-5} x 1121,11) x 1121,11 = 33796 "
H_2 = 42,48 x (0,301 + 2,0x10^{-5} x 1121,11) x 1121,11 = 15403 "
Total contenido de calor a 1121,11°C = 167424 Kcal./min.

Contenido de calor de los productos de combustión a 293,33°C:

$N_2 + O_2$ = 322,82 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 293,33) x 293,33 = 29208 Kcal./min.
CO_2 = 59,47 x (0,406 + 9,0x10^{-5} x 293,33) x 293,33 = 7543 "
H_2 = 42,48 x (0,301 + 2,0x10^{-5} x 293,33) x 293,33 = 4824 "
Total contenido de calor a 293,33°C = 40575 Kcal./min.

Calor liberado por los productos de combustión en la caldera = 167424 – 40575 = 126849 Kcal./min.

$$\text{Calor liberado} = 126849\frac{\text{Kcal.}}{\text{min.}}x\frac{1\,\text{B.H.P}}{140{,}7\,\text{Kcal.}/\text{min.}} = 901{,}6\ \text{B.H.P}$$

Calor liberado = 901,6 B.H.P (3-1)

EJERCICIO N°4 (9)

Una carga de 20 toneladas de cobre líquido a 2350°F se enfría a 2200°F, añadiendo cobre sólido a 77°F. Supóngase que no hay pérdidas de calor.

PREGUNTAS

1. ¿Qué cantidad de cobre sólido debe usarse?
2. ¿Qué temperatura se alcanzaría si en su lugar se añadieran 2 toneladas de cobre sólido?

SOLUCION

1.
De conformidad con el principio de conservación de la energía, el calor perdido por el cobre que se enfría hasta 2200°F, es el calor que gana el cobre que se calienta desde 77°F.

Temperaturas:

2350°F = 5/9 x (2350 – 32) = 1287,8°C
2200°F = 5/9 x (2200 – 32) = 1204,4°C
77°F = 5/9 x (77 – 32) = 25°C.

Algunos datos para el cobre:

Temperatura de fusión = 1084°C.
Calor latente de fusión = 57,6 lb.-cal./lb.
Contenido de calor total al punto de fusión (Q.L.M.P) = 172 lb-cal/lb
Calor específico del Cu. líquido = 0,112
Calor específico del Cu. sólido = $0,092 + 1,25x10^{-5}$ t.

Para el cálculo de los contenidos de calor del material, usaremos la ecuación siguiente:

$$Q = W \cdot C_m \cdot t \qquad (3)$$

Q = calor absorbido o desprendido
W = peso del material
C_m = calor específico
t = temperatura, °C.

Peso de la carga = 20 x 2000 = 40000 lbs.

Contenido de calor en el cobre:

A 1287,8°C = 40000 x 172 + 40000 x 0,112 x (1287,8 – 1084) = 7'793.024 lb-cal
A 1204,4°C = 40000 x 172 + 40000 x 0,112 x (1204.4 – 1084) = 7'419.392 lb-cal.

Calor cedido por la carga, al pasar de 1287,8°C a 1204,4°C
= 7'793.024 – 7'419.392 = 373632 lb-cal.

Contenido de calor del cobre enfriador a 25°C
= W x (0,092 + $1,25x10^{-5}$ x 25) x 25 = 2,308W

Contenido de calor del cobre enfriador a 1204,4°C
= W x 172 + W x 0,112 x (1204,4 – 1084) = 185,485W

Calor ganado por el cobre enfriador al pasar de 25°C a 1204,4°C
= 185,475W – 2,398W = 183,177W

calor ganado = calor perdido

183,177W = 373632 ∴
W = 373632/183,177 = 2040

Peso del cobre sólido añadido = 2040 lbs. (4-1)

2.
Carga del enfriador = 2 x 2000 = 4000 lbs.

Contenido de calor de la carga a la temperatura final "t"
= 40000 x 172 + 40000 x 0,112 x (t – 1084) = 2'023.680 + 4480 t

Calor perdido por la carga al pasar desde 1287,8°C a "t°C"
= 7'793.024 – (2'023.680 + 4480t) = 5'769.344 – 4480 t.

Contenido de calor del enfriador a 25°C
= 4000 x (0,092 + $1,25x10^{-5}$ x 25) x 25 = 9231 lb-cal.

Contenido de calor del enfriador a la temperatura "t"
= 4000 x 172 + 4000 x 0,112 x (t – 1084) = 202368 + 448 t

Calor ganado por el enfriador al pasar de 25°C a "t°C"
= 202368 + 448 t – 9231 = 193137 + 448 t
5'769.344 – 4480 t = 193137 + 448 t

5'576.207 = 4928 t ∴

t = 5'576.207/4926 = 1131,5°C.

Temperatura alcanzada = 1131,5°C (4-2)

EJERCICIO N°5 (9)

El aire a 300°F y el carbono a 2000°F reaccionan para producir una mezcla de N_2, CO_2 y C en exceso, teniendo la mezcla una temperatura de 2400°F.

Hay presente un 100% de C en exceso.

El proceso se conduce a una presión constante de 1 atmósfera.

PREGUNTAS

1. Calcular el cambio de calor para este proceso, en BTU por libra de carbono inicialmente presente en el sistema y decir si esta cantidad de calor es absorbido o producido.

SOLUCION

1.

Reacción:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$

C = 1 libra, C que reacciona = 0,5 libras = C en exceso.

O = 0,5 x 16/12 = 0,667 lbs.
CO = 0,5 x 28/12 = 1,167 lbs.
N = 0,667 x 76,8/23,2 = 2,208 lbs.

Contenido de calor en la carga:

El aire entra a 300°F.

Las tablas de este libro no traen valores para el aire, pero se puede determinar a través del oxígeno y el nitrógeno, para encontrar $H_t - H_{77}$:

Hacemos una interpolación entre los siguientes valores:

<u>Para el O_2:</u>

t = 200°F: $H_t - H_{77}$ = 870 BTU/lb.-mol
t = 400°F: $H_t - H_{77}$ = 2320 "

Interpolando, encontramos: $H_{300} - H_{77}$ = 1595 BTU/lb-mol
$H_{300} - H_{77}$ = 1595 (BTU/lb-mol) x 1 (lb-mol/32 lbs) x 0,667 lbs = 33,25 BTU

<u>Para el N_2:</u>

t = 200°F: $H_t - H_{77}$ = 860 BTU/lb-mol.
t = 400°F: $H_t - H_{77}$ = 2260 "

Interpolando: $H_{300} - H_{77}$ = 1560 BTU/lb-mol.

$H_{300} - H_{77}$ = 1560 (BTU/lb-mol) x (lb-mol/28 lbs) x 2,208 lbs = 123,02 BTU.

El carbono entra a 2000°F:

Contenido de calor en el C:

$H_{2000} - H_{77} =$ 8550 (BTU/lb-mol) x (mol/12 lbs) x 1 lb. = 712,5 BTU.

Contenido de calor en la carga = 33,25 + 123,02 + 712,5 = 868,77 BTU por libra de C.

Contenido de calor en los productos de combustión a 2400°F:

Para el CO:

t = 2000°F: $H_t - H_{77} =$ 14700 BTU/mol.
t = 2500°F: $H_t - H_{77} =$ 18900 "

Interpolando: $H_{2400} - H_{77} =$ 18060 BTU/mol.

Contenido de calor en el CO = 18060 x 1,167/28 = 752,72 BTU.

Para el N_2:

t = 2000°F: $H_t - H_{77} =$ 14600 BTU/mol.
t = 2500°F: $H_t - H_{77} =$ 18700 "

Interpolando: $H_{2400} - H_{77} =$ 17800
Contenido de calor en el N_2 = 17880 x 2,208/28 = 1410 BTU.

Para el C:

H_{2400} – H77 = 10800 BTU/mol.
$H_{2400} - H_{77} =$ 10800 x 0,5/12 = 450 BTU

Contenido de calor en los productos de combustión = 752,72 + 1410 + 450 = 2612,72 BTU.

Calor de formación del CO (298K) = - 53280 BTU/lb-mol.

CO = 1,167/28 = 0,042 lb.-mol

Calor de formación del CO = - 53280 x 0,042 = - 2221 BTU.

El resultado para este proceso, por libra de C inicialmente cargado:

Carga = 868,77 BTU
Reacción = 2221,00 BTU
Total calor aportado = 3089,77 BTU

Calor entregado a los productos de combustión = 2612,72 BTU

El calor aportado siempre lleva signo negativo porque se le entrega a los alrededores al sistema.

Calor neto = 2612,72 – 3089,77 = - 477,05 BTU.

Cambio de calor = 477,05 BTU (5-1)

Este es un calor producido debido a que el sistema se lo entrega a los alrededores.

EJERCICIO Nº6 (9)

2000 kilogramos por hora de un concentrado de zinc húmedo (90%ZnS, 10%H_2O), se tuestan con aire seco para producir ZnO sólido y un producto gaseoso conteniendo (base seco): 5%SO_2, balance N_2 y O_2.

Todo en S del ZnS que entra se convierte en SO_2.

Los materiales de alimentación están a 25ºC y los productos (ZnO y gases) están a 427ºC.

PREGUNTAS

1. ¿Cuál es la velocidad de pérdida de calor desde el horno a los alrededores, en kilocalorías por hora?.

SOLUCION

1.

Carga (concentrado) = 2000 Kg./hr.

ZnS = 2000 x 0,9 = 1800 Kg./hr. = 18,48 moles/hr.
H_2O = 2000 x 0,1 = 200 Kg./hr. = 11,11 "

Reacción de tostación:

$ZnS + 1,5\ O_2 = ZnO + SO_2$

O_2 = 1800 x 1,5 x 22,4/97,4 = 620,94 m^3 = 887,06 Kg. = 27,72 moles.

ZnO = 1800 x 81,4/97,4 = 1504,3 Kg. = 18,48 moles.

SO_2 = 1800 x 64/97,4 = 1504,3 Kg. = 413,96 m^3 = 18,48 moles.

<u>Cálculo de los gases:</u>

N_2 teórico = 620,94 x 79/21 = 2336 m^3
Aire teórico = 620,94 + 2336 = 2956,94 m^3

Gas seco = SO_2 + N_2 total + O_2 en exceso

Gas seco, sin SO_2 = 100 – 5 = 95%

Gas total = 413,96/0,05 = 8279,2 m^3

Aire exceso seco = gas total – SO_2 – N_2 teórico = 8279,2 – 413,96 – 2336 = 5529,24 m^3

Gas húmedo:

N_2 = 2336 + 5529,24 x 0,79	= 6704,10 m^3	= 78,61%
O_2 = 5529,24 x 0,21	= 1161,14	= 13,62%
H_2O = 200 x 22,4/18	= 248,89	= 2,92%
SO_2	= 413,96	= 4,85%
	8528,09 m^3	= 100,00%

Calores de formación (ver tablas):

ZnS = - 48500 Kcal./mol.
ZnO = - 83170 "
SO_2 = - 70960 "

Reacción de tostación:

$ZnS + 1,5\ O_2 = ZnO + SO_2$

$\Delta H^o_{298} = 18,48 \times (-70960 - 83170 + 48500) = -1'952.042,4$ Kcal.

Contenido de calor en los productos:

$H_T - H_{298} = aT + bT^2 + cT^{-1} + d$ (Kcal./mol)

Gases:
$N_2 = 6704,10 \times 28/22,4 = 8380,125$ Kg. = 299,29 moles.
$O_2 = 1161,14 /22,4 = 51,84$ moles
$H_2O = 11,11$ moles
$SO_2 = 18,48$ moles.

$T = 427 + 273 = 700K$

Para el N_2:
$H_T - H_{298} = 6,66T + 0,51x10^{-3}T^2 - 2031$

Para el O_2:
$H_T - H_{298} = 7,16T + 0,5x10^{-3}T^2 + 0,4x10^5T^{-1} - 2313$

Para el H_2O:
$H_T - H_{298} = 7,17T + 1,28x10^{-3}T^2 - 0,08x10^5T^{-1} - 2225$

Para el SO_2:
$H_T - H_{298} = 10,38T + 1,27x10^{-3}T^2 + 1,42x10^5T^{-1} - 3683$

Contenido de calor en los gases a 700K:

$N_2 = (6,66 \times 700 + 0,51x10^{-3} \times 700^2 - 2031) \times 299,29$ = 862225 Kcal.
$O_2 = (7,16 \times 700 + 0,5x10^{-3} \times 700^2 + 0,4x10^5 \times 700^{-1} - 2313) \times 51,84$ = 155579
$H_2O = (7,17 \times 700 + 1,28x10^{-3} \times 700^2 - 0,08x10^5 \times 700^{-1} - 2225) \times 11,11$ = 37883
$SO_2 = (10,38 \times 700 + 1,27x10^{-3} \times 700^2 + 1,42x10^5 \times 700^{-1} - 3683) \times 18,48$ = 81463
Total contenido de calor en los gases = 1'137.150 Kcal.

Para el ZnO:
$H_T - H_{298} = 11,71T + 0,61x10^{-3}T^2 + 2,18x10^5T^{-1} - 4277$

Contenido de calor en ZnO a 700°C:
$H_T - H_{298} = 18,48 \times (11,71 \times 700 + 0,61x10^{-3} \times 700^2 + 2,18x10^5 \times 700^{-1} - 4277) = 83720$

Calor utilizado en evaporación del $H_2O = 586 \times 200 = 117200$ Kcal.

Pérdidas de calor = 1'952.042 – 1'137.150 – 83720 – 117200 = 613972 Kcal./hr.
Pérdida de calor desde el horno a los alrededores = 613972 Kcal./hr. (6-1)

EJERCICIO N°7 (9)

El carbonato de calcio se descompone en CaO y CO_2 al calentarlo en un horno giratorio, utilizando como combustible un gas natural consistente en metano (CH_4) puro.

El CO_2 generado de la descomposición del carbonato de calcio, se mezcla con los productos de la combustión para formar los gases efluentes.

El consumo de combustible es de 8000 ft^3/ton. (C.N) de CaO producido.

El análisis promedio de los gases de la combustión sobre una base de en seco es de 75%N_2, 4%O_2 y 21%CO_2.

Las temperaturas son como sigue:
Carbonato de calcio entrante, combustible y aire; todos sustancialmente a 77°F.
El producto de óxido de calcio (CaO), sale a 2200°F.
Los gases de la combustión dejan el horno a 1100°F.

PREGUNTAS

1. Realizar un balance térmico del proceso.

SOLUCION

1.
Cálculo de materias:

Base = 1 tonelada (2000 libras) de CaO.

Reacción de descomposición del $CaCO_3$:

$CaCO_3 = CaO + CO_2$

$CaCO_3$ = 2000 x 100/56 = 3571,43 Lbs. = 35,71 moles.
CO_2 = 2000 x 44/56 = 1571,43 lbs. = 12821,43 ft^3 = 35,71 moles.

Reacción de combustión:

$CH_4 + 2\,O_2 = CO_2 + 2H_2O$

O_2 = 8000 x 2 = 16000 ft^3
CO_2 = 8000 ft^3
CO_2 total = 8000 + 12821,43 = 20821 ft^3
H_2O = 8000 x 2 = 16000 ft^3

Gas seco = 20821/0,21 = 99148 ft^3

Gas total:

N_2 = 99148 x 0,75	= 74361 ft^3	=	64,58%
O_2 = 99148 x 0,04	= 3966	=	3,44%
CO_2	= 20281	=	18,08%
H_2O	= 16000	=	13,90%
Total gas húmedo	= 115148 ft^3	=	100,00%

Cálculo de los calores:

1 Kcal. = 2,205 lb.-cal. = 3,97 BTU

Potencia calorífica del CH_4 = 962 BTU/ft^3
Potencia calorífica total del CH_4 = 962 x 8000 = 7'696.000 BTU

Calores de formación (-):

CaO = 151,9 x 1800 = 273420 BTU/mol.
CO_2 = 97,2 x 1800 = 174960 "
$CaCO_3$ = 288,45 x 1800 = 519210 "

Calor de descomposición del $CaCO_3$
= 35,71 x (- 174960 – 273420 + 519210) = + 2'529.340 BTU.
Contenido de calor en los productos al salir:

Para el CaO a 2200°F:

$H_{2200} - H_{77} = 26000$ BTU/mol.
$H_{2200} - H_{77} = 26000 \times 35{,}71 = 928460$ BTU

Para los gases a 1100°F:

$N_2 = 74361/359 = 207{,}13$ moles
$O_2 = 3966/359 = 11{,}05$ moles.
$CO_2 = 20821/359 = 58$ moles
$H_2O = 16000/359 = 44{,}57$ moles.

$H_t - H_{77} =$ BTU/mol.

Las tablas, página 398 de este libro, no traen valores para $H_{1100} - H_{77}$, pero si los traen para t = 1000°F y para t = 1200°F. Interpolando entre los valores de estas dos temperaturas, se pudo determinar para t = 1100°F, así:

Para el N_2:
$H_{1100} - H_{77} = 7385$ BTU/mol

Para el O_2:
$H_{1100} - H_{77} = 7790$ BTU/mol.

Para el CO_2:
$H_{1100} - H_{77} = 11350$ BTU/mol.

Para el H_2O:
$H_{1100} - H_{77} = 8875$ BTU/mol.

Contenido de calor del gas al salir:

$N_2 = 207{,}3 \times 7385$ = 1'529.655 BTU.
$O_2 = 11{,}05 \times 7790$ = 86.080
$CO_2 = 58 \times 11350$ = 658.300
$H_2O = 44{,}57 \times 8875$ = 395.559
Calor en el gas al salir = 2'669.594 BTU

BALANCE TERMICO (7-1)

CALOR SUMINISTRADO (BTU)		CALOR DISTRIBUIDO (BTU)	
Potencia calorífica del CH_4 = 7'696.000	100,0%	Descomposición $CaCO_3$ = 2'529.340	32,87%
		Calor sacado por el CaO = 928.460	12,06%
		Calor sacado por el gas = 2'669.594	34,69%
		Pérdidas = 1'568.606	20,38%
		Total = 7'696.000	100,0%

EJERCICIO N°8 (9)

Una tonelada corta de carbón con un poder calorífico de 13500 BTU por libra, rinde como productos principales de la coquización 0,75 toneladas de coque con un poder calorífico de 12000 BTU por libra, 10000 pies cúbicos de gas de carbón con un poder calorífico de 550 BTU por pie cúbico y 75 libras de alquitrán, con un poder calorífico de 16000 BTU por libra.

Los valores térmicos de los otros productos pueden pasarse por alto.

El 40% del gas se quema para calentar el horno.

PREGUNTAS

1. Preparar un balance térmico para el proceso de coquización como un todo y calcular la cantidad total de calor consumido como pérdida de calor del horno y los calores sensibles en los productos (coque, gas, productos de combustión, etc.), en BTU por tonelada de carbón.

2. Expresar este consumo de calor como un porcentaje del valor calorífico original del carbón.

3. ¿Qué porcentajes del poder calorífico original del carbón, se recuperan finalmente en el coque, alquitrán y 6000 pies cúbicos de gas de carbón?

SOLUCION

1.

1 tonelada corta = 2000 libras.

Poder calorífico del carbón = 13500 (BTU/lb) x 2000 lbs. = 27'000.000 BTU
Poder calorífico del coque = 12000 (BTU/lb) x 0,75 x 2000 lb = 18'000.000 BTU
Poder calorífico del gas = 550 (BTU/ft^3) x 10000 ft^3 = 5'500.000 BTU
Poder calorífico del alquitrán = 16000 (BTU/lb) x 75 lbs. = 1'200.000 BTU.
Poder calorífico del gas formado (calentamiento) = 5'500.000 x 0,4 = 2'200.000 BTU.
Calor sacado en el gas = 5'500.000 – 2'200.000 = 3'300.000 BTU
Las pérdidas + los calores sensibles se obtienen por diferencia.

BALANCE TERMICO (8-1)

CALOR DE ENTRADA (BTU)	CALOR DE SALIDA (BTU)
Poder calorífico del carbón = 27'000.000	Poder calorífico del coque = 18'000.000
Calentamiento del horno = 2'200.000	Poder calorífico del alquitrán = 1'200.000
	Poder calorífico del gas = 3'300.000
	Pérdidas de calor + calores sensibles = 6'700.000
Total = 29'200.000	Total = 29'200.000

2.

Pérdidas + calor sensible = 6'700.000 / 29'200.000 = 0,2295
Pérdidas + calores sensibles = 24,8% del original del carbón (8-2)

3.

Calor recuperado en el coque = 1'200.000/27'000.000 = 0,666
Calor del carbón recuperado en el coque = 66,6% (8-3)

Calor recuperado en el alquitrán = 1,2/27 = 0,0444
Calor del carbón recuperado en el alquitrán = 4,44% (8-3)

Calor recuperado en el gas = 550 x 6000 / 27'000.000 = 0,1222
Calor del carbón recuperado en el gas = 12,22% (8-3)

EJERCICIO N°9 (7)

En el horno del ejercicio #13 del Capítulo VII, el soplo es precalentado a 650°C. Los gases salen del horno a 250°C.

El horno utiliza, por tonelada de arrabio, 500 galones de agua para enfriamiento; la cual entra a 10°C y sale a 60°C.

La escoria y el arrabio salen del horno a 1500°C. Calor específico de la escoria, 0,27. Calor específico del arrabio, 0,15.

El calor de formación de la escoria es 360 kilocalorías por kilogramo de SiO_2. Despreciar el calor de solución del Mn, Si y P en el arrabio.

PREGUNTAS

1. Realizar un balance de calor del horno.

SOLUCION

1.
1 galón británico = 1,201 galón U.S.A
1 galón U.S.A = 3,7854 litros; 1 litro = 0,2642 galones U.S.A.
1 m^3 = 35,314 ft^3

Calor aportado:

$C \rightarrow$ gas = 1407 lbs.
$C \rightarrow CO$ = 2100 x 12/28 = 900 lbs.
$C \rightarrow CO_2$ = 1407 – 900 = 507 lbs.

Calor generado cuando $C \rightarrow CO$ = 900 x 2430 = 2'187.000 lb.-cal
" " " $C \rightarrow CO_2$ = 507 x 8100 = 4'106.700
6'293.700 lb.-cal

Precalentamiento del soplo a 650°C:

Soplo = 91000 ft^3 x 29/359 = 7351 lbs.
Calor sensible = 7351 x (0,234 + 1,7x10^{-5} x 650) x 650 = 1'170.886 lb.-cal.

Precalentamiento del agua a 10°C

H_2O = 500 gal. x 3,7854 lts. /1 gal = 1892,5 lts. = 1892,5 Kg. x 1 lb./0,4536 Kg. = 4172,2 lbs.
Calor sensible = 4172,2 x (0,463 + 6,2 x10^{-5} x 10) x 10 = 19343 lbs.-cal.

Calor de formación de la escoria:

SiO_2 = 274,7 x 2000/1176,5 = 467 lbs.
Calor de formación de la escoria = 360 (Kcal./Kg.) x 2,2046 (lb.-cal/Kcal.) x 0,4536 Kg./lb. = 360 lb-cal/lb.
Calor de formación de la escoria = 467 x 360 = 168120 lb-cal.

Calores de descomposición:

Fe_2O_3 = 2Fe + 3 O

Fe_2O_3 = 2720 lbs. = 2720/260 = 17 moles.
Calor de descomposición = 17 x 98500 = 3'374.500

Formación del FeO: Fe + O = FeO
Calor de formación del FeO = 64300 x 33,3/72 = 29739
Calor neto de descomposición del Fe_2O_3 = 3'374.500 – 29739 = 3'344.761

MnO = Mn + O

MnO reducido = 51,8 lbs = 51,8/71 = 0,7296 moles.
Calor de descomposición del MnO = 0,7296 x 96500 = 70406 lb-cal.

SiO_2 = Si + 2 O

SiO_2 reducido = 28 + 32 = 60 lbs. = 1 mol.
Calor de descomposición del SiO_2 = 1 x 201000 = 201000 lb-cal.

$CaCO_3 = CO_2 + CaO$

$CaCO_3$ = 670 lbs. = 6,7 moles.
Calor de descomposición del $CaCO_3$ = 6,7 x 43500 = 291450

Contenido de calor de los productos al salir:

Arrabio a 1500°C:

El contenido de calor del arrabio en su punto de fusión (1100°C), se toma como = 230 lb.-cal/lb.
Contenido de calor del arrabio a la temperatura de salida (1500°C)
= 2000 x 230 + 2000 x 0,15 x (1500 – 1100) = 580000 lb-cal.

Escoria a 1500°C:

Escoria = 638,5 x 2000/1176,5 = 1085,4 lbs.
Si asumimos para la escoria un punto de fusión de 1400°C (7, pag. 398), en este punto; tendrá un contenido de calor de 450 lb-cal/lb.
Contenido de calor de la escoria a la temperatura de salida (1500°C)
= 1085,4 x 450 + 1085,4 x 0,30 x (1500 – 1400) = 520992 lb-cal.

Contenido de calor del agua al salir (60°C)
= 4172,2 x (0,463 + $6,2x10^{-5}$ x 60) x 60 = 116835 lb-cal.

Gases a 250°C:

CO = 2100 x (0,242 + $1,8x10^{-5}$ x 250) x 250 = 129413 lb.-cal
CO_2 = 2153,8 x (0,205 + $4,6x10^{-5}$ x 250) x 250 = 116574
H_2O = 136 x (0,463 + $6,2x10^{-5}$ x 250) x 250 = 16269
N_2 = 71890 x (28/359) x (0,24 + $1,8x10^{-5}$ x 250) x 250 = 342729
Contenido de calor de los gases al salir = 604985 lb.-cal

Calor absorbido por evaporación del H_2O = 136 x 586 = 79696 lb-cal.

Las pérdidas se obtienen por diferencia entre el calor suministrado y el calor utilizado.

Con los cálculos anteriores se realiza el balance de calor que aparece a continuación:

BALANCE DE CALOR (9-1)

CALOR SUMINISTRADO (lb.-cal)		CALOR DISTRIBUIDO (lb-cal)	
Combustión del coque = 6'293.700	82,25%	Descomposición del Fe_2O_3 = 3'344.761	43,71%
Precalentamiento del soplo = 1'170.886	15,30%	Descomposición del MnO = 70.406	0,92%
Agua al entrar = 19.343	0,25%	Descomposición del SiO_2 = 201.000	2,63%
Formación de escoria = 168.120	2,20%	Descomposición del $CaCO_3$ = 291.450	3,81%
		Calor en el arrabio al salir = 580.000	7,58%
		Calor en la escoria al salir = 520.992	6,81%
		Calor en los gases al salir = 604.985	7,91%
		Calor en el agua al salir = 116.835	1,53%
		Para evaporación del agua = 79.696	1,04%
		Pérdidas por radiación, etc. = 1'841.924	24,06%
Total = 7'652.049	100,0%	Total = 7'652.049	100,0%

EJERCICIO N°10 (7)

Se asume un alto horno para reducir Fe_2O_3 puro a Fe, y se asume también que todas las reducciones son producidas por CO. Por cada 960 kilogramos de Fe producido se cargan 300 de $CaCO_3$ y 800 kilogramos de C puro que son quemados en las toberas.

La temperatura del soplo es de 800°C y la de los gases al salir es de 200°C. La escoria contiene 45%CaO. La temperatura de la escoria y del Fe al salir del horno es de 1600°C. El punto de fusión de la escoria y del hierro es de 1500°C.

PREGUNTAS

1. El volumen y composición del gas del alto horno, por tonelada métrica de Fe producido.
2. El volumen de soplo requerido, por tonelada de Fe.
3. El porcentaje de la potencia calorífica total del combustible que es desarrollado en el horno.
4. Un balance de calor del horno, por 1000 kilogramos de Fe reducidos.

SOLUCION

1.

Gas de alto horno = $CO + CO_2 + N_2$

Fe producido = 1000 Kg.
$CaCO_3$ cargado = 300 x 1000/960 = 312,5 Kg.
C cargado = 800 x 1000/960 = 833,4 Kg.

Reacción en las toberas:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$: CO = 833,4 x 22,4/12 = 1555,68 m^3
O_2 = CO/2 = 777,84 m^3
N_2 = 777,84 x 79/21 = 2926,16 m^3

Reacción de reducción:

$Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$

CO consumido = CO_2 producido = 1000 x (3x22,4/2x56) = 600 m^3

CO_2 del $CaCO_3$ = 312,5 x 22,4/100 = 70 m^3

Volumen y composición del gas (10-1)

CO = 1555,68 – 600 =	955,68 m^3	= 21,00%
CO_2 = 600 + 70	= 670,00	= 14,72%
N_2	= <u>2926,16</u>	= <u>64,28%</u>
Total gas	= 4551,84 m^3	= 100,00%

2.

Soplo = 777,84/0,21 = 3704 m^3

Soplo requerido = 3704 m^3/ton. de Fe. (10-2)

3.

Potencia calorífica total del C = 833,4 x 8100 = 6'750.540 Kcal.

$C \rightarrow CO$ = 955,68 x 12/22,4 = 511,97 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 600 x 12/22,4 = 321,43 Kg.

Calor generado cuando $C \rightarrow CO$ = 511,97 x 2430 = 1'244.087 Kcal.
" " " $C \rightarrow CO_2$ = 321,43 x 8100 = 2'603.583 "
Total calor desarrollado = 3'847.670 Kcal.

Calor desarrollado = 3'847.670/6'750.540 = 0,57

Calor desarrollado en el horno = 57,0% (10-3)

4.

Precalentamiento del aire a 800°C
= 3704 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 800) x 800 = 947039 Kcal.

Calor de descomposición del Fe_2O_3 = 1000 x 1777 = 1'777.000 Kcal.

Calor de descomposición del $CaCO_3$ = 43450 x 312,5/100 = 135781 Kcal.

Peso de la escoria = 312,5 x 0,56/0,45 = 389 Kg.
CaO en escoria = 389 x 0,45 = 175 Kg.

Calor de formación de la escoria:

Asumiendo que se forma el compuesto $CaO.SiO_2$, cuya relación de pesos moleculares = 56/60 = 0,934 es bastante cercana a la relación CaO/SiO_2 de la escoria = 175/(389-175) = 0,818; y asumiendo que el resto de la escoria es SiO_2 y que la relación puede acercarse más si existe otro compuesto en poca proporción, de la Tabla XLIV (B) del Apéndice, podemos tomar el calor de formación como = 25200/56 = 450 Kg./Kg. de CaO.

Calor de formación de la escoria = 450 x 175 = 78750 Kcal.

Vamos a asumir, a falta de más datos (pag. 398 del libro), que el contenido de calor de la escoria en su punto de fusión es de 450 Kcal./Kg. y que su calor específico en estado líquido = 0,25:

Contenido de calor de la escoria a 1600°C
= 389 x 450 + 389 x 0,25 x (1600 – 1500) = 184775 Kcal.

Contenido de calor del Fe a 1600°C = 334 x 1000 + 1000 x 0,21 x 100 = 355000 Kcal.

Contenido de calor en los gases a 200°C:

$CO + N_2$ = 3881,84 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 200) x 200 = 237879 Kcal.
CO_2 = 670 x (0,406 + 9,0x10^{-5} x 200) x 200 = 56816
294695 Kcal.

BALANCE DE CALOR (10-4)

CALOR SUMINISTRADO (Kcal.)	(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal.)	(%)
Combustión del C = 3'847.670	78,95	Descomposición de $CaCO_3$ = 135.781	2,79
Precalentamiento del aire = 947.039	19,43	Descomposición de Fe_2O_3 = 1'777.000	36,46
Formación de escoria = 78.750	1,62	Calor en escoria = 184.775	3,79
	100,00	Calor en Fe = 355.000	7,28
		Calor en gas = 294.695	6,05
		Pérdidas por radiación, etc. = 2'126.208	43,63
Total = 4'873.459		Total = 4'873.459	100,00

EJERCICIO N°11 (7)

En al alto horno del ejercicio #19, Cap. VII; los gases salen del horno a 350°C, mientras que el aire es precalentado a 700°C. La escoria cuando sale del horno contiene 500 kilocalorías por kilogramo y el arrabio 315 Kcal./Kg. El calor perdido en el agua de enfriamiento alrededor de las toberas y los etalajes es de 200 Kcal./Kg. de arrabio producido. El calor de formación de la escoria es de 280 Kcal./Kg. de escoria.

PREGUNTAS

1. Un balance de calor del horno, por 1000 kilogramos de mineral tratado.

SOLUCION

1.

Calor derivado de la combustión del coque:

Tenemos que trasladar la escala de 1´400.000 Kg. de mineral hasta 1000 Kg. de este.

C del coque → gas = 831660 x 1000/1'400.000 = 594,04 Kg.

CO = 1'458.537 x (1000/1'400.000) = 1041,81 Kg.
C de este = 1041,81 x 12/28 = 446,49 Kg.

CO_2 de combustión = 757433 x (1000/1'400.000) = 541,02 Kg.
C de este = 541,02 x 12/44 = 147,55 Kg.

Calor generado cuando C → CO = 446,49 x 2430 = 1'084.971 Kcal.
" " " C → CO_2 = 147,55 x 8100 = <u>1'195.155 Kcal.</u>
Calor generado por combustión = 2'280.126 Kcal.

Precalentamiento del aire a 700°C:

Arrabio = 856 x (1000/1'400.000) = 0,6114 ton.

Aire = 4000 x 0,6114 = 2445,7 m^3
Calor por precalentamiento del aire
= 2445,7 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 700) x 700 = 543386 Kcal.

Calor de formación de la escoria:

Escoria = 378000 x (1/1400) = 270 Kg.
Calor de formación de la escoria = 270 x 280 = 75600 Kcal.

Calores de reducción de óxidos:

Fe reducido del Fe_3O_4 = 1000 x 0,68 x 168/232 = 492,4 Kg.
Fe reducido del Fe_2O_3 = 1000 x 0,08 x 112/160 = 56,0 Kg.

P reducido del $Ca_3(PO_4)_2$ = 1000 x 0,03 x 62/310 = 6 Kg.
Ca = 6 x 3x40/62 = 11,61 Kg.; CaO = 11,61 x 56/40 = 16,26 Kg.

Mn reducido del MnO = 1000 x 0,05 x 0,4 x 55/71 = 15,49 Kg.

Coque = 1000 x 0,7 = 700 Kg.

Si reducido = 0,22 x (1000 x 0,12 + 700 x 0,08) x 28/60 = 18,1 Kg.

Calores de reducción de óxidos:

$Fe_3O_4 \rightarrow Fe$ = 492,4 x 1588 = 781.931,2 Kcal.
$Fe_2O_3 \rightarrow Fe$ = 56 x 1777 = 99.512,0
$Ca_3(PO_4)_2 \rightarrow P$ = 11,61 x 8170 = 94.853,7
$SiO_2 \rightarrow Si$ = 18,1 x 7160 = 129.596,0
$MnO \rightarrow Mn$ = 15,49 x 1757 = 27.215,9
1'133.109,0 Kcal.

Descomposición del $CaCO_3$:

$CaCO_3$ = 244 x 1000 x (1/1400) = 174,29 Kg. = 1,743 moles.
Calor de descomposición del $CaCO_3$ = 1,743 x 43450 = 75733 Kcal.

Evaporación del agua:

H_2O = 1000 x 0,04 + 700 x 0,04 = 68 Kg.
Calor por evaporación del agua = 68 x 586 = 39848 Kcal.

Calor sensible en el gas al salir a 350°C:

N_2 = 4000 x 0,6114 x 0,79 = 1932 m^3
H_2O = 118471 x 1/1400 = 84,62 m^3
CO = 1'116.830 x 1/1400 = 797,74 m^3
CO_2 = 440177 x 1/1400 = 314,41 m^3

$CO + N_2$ = 2719,74 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 350) x 350 = 295890 Kcal.
H_2O = 84,62 x (0,373 + 5,0x10^{-5} x 350) x 350 = 11565
CO_2 = 314,41 x (0,406 + 9,0x10^{-5} x 350) x 350 = 48144
Contenido de calor en el gas al salir = 355599 Kcal.

Calor sensible en arrabio = 0,6114 x 1000 x 315 = 192591 Kcal.

Calor sensible en la escoria = 270 x 500 = 135000 Kcal.

Calor perdido en el agua de enfriamiento = 0,6114 x 1000 x 200 = 122280 Kcal.

Calor de formación del arrabio:

C en arrabio = 0,6114 x 1000 x 0,036 = 22 Kg.
Si en arrabio = 0,6114 x 1000 x 0,03 = 18 Kg.

BALANCE DE CALOR (11-1)

CALOR SUMINISTRADO (Kcal.)	(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal.)	(%)
Combustión del coque = 2'280.126	78,65	Formación de arrabio = 22.383	0,77
Precalentamiento del aire = 543.386	18,74	Reducción de óxidos = 1'133.109	39,08
Formación de escoria = 75.600	2,61	Descomposición $CaCO_3$ = 75.733	2,61
Total = 2'899.112	100,00	Evaporación H_2O = 39.848	1,38
		Gas al salir = 355.599	12,27
		Sensible en arrabio = 192.591	6,64
		Sensible en escoria = 135.000	4,66
		Agua de enfriamiento = 122.280	4,22
		Pérdidas por radiación, etc. = 822.586	28,37
		Total = 2'899.112	100,00

Si asumimos la formación de Fe_3C y Fe_3Si, pero despreciamos la influencia del Mn y el P por estar en cantidades muy pequeñas, tendríamos:

$C \rightarrow Fe_3C = 22 \times 433 = 9526$ Kcal.
$Si \rightarrow Fe_3Si = 20000 \times (18/28) = 2857$ Kcal.
22383 Kcal.

EJERCICIO N°12 (7)

Un mineral de magnetita es fundido en un horno eléctrico para arrabio. El análisis del mineral fue el siguiente:

Fe_3O_4	78,0%	MgO	5,4%
SiO_2	7,0	S	0,6
Al_2O_3	2,0	CO_2	2,0
CaO	3,0	H_2O	2,0

Se utiliza como agente reductor carbón de leña (asumir C puro) conteniendo 6%H_2O y su cantidad fue de un cuarto del peso del Fe reducido. Se utiliza como fundente SiO_2 puro para producir una escoria con 33%SiO_2. El arrabio producido contiene 4%C; 3,5%Si y el balance es Fe.

La escoria y el arrabio al colarlos contienen 570 y 330 kilocalorías por kilogramo, respectivamente.

Asumir que todo el hierro es reducido a Fe y que todo el azufre para a la escoria como CaS. El calor de combinación de los óxidos para formar la escoria es de 150 kilocalorías por kilogramo de $SiO_2 + Al_2O_3$. Un tercio del calor suministrado al horno procede de la oxidación del C y la formación de la escoria y dos tercios procede de la corriente eléctrica.

Despreciar la oxidación de los electrodos.

Los gases salen del horno a 300°C.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral, fundente y carbón de madera necesarios, por tonelada métrica de arrabio producido.
2. La composición del gas que sale del horno, despreciando cualquier infiltración de aire.
3. Los kilovatio - hora de electricidad requeridos, por tonelada de arrabio producido.
4. El porcentaje del calor total en el horno que está representado por el contenido de calor en el arrabio, la escoria y el gas, y por la potencia calorífica del gas.

SOLUCION

1.
Arrabio = 1000 Kg.

Fe en mineral = Fe en arrabio.

Fe en arrabio = 100 – 4 – 3,5 = 92,5%
Fe en arrabio = 1000 x 0,925 = 925 Kg.

Fe_3O_4 = 925 x 232/168 = 1277,4 Kg.

Mineral = 1277,4/0,78 = 1637,7 Kg.

Peso del mineral = 1637,7 Kg. (12-1)

Peso del carbón de leña = 925 x ¼ = 231,25 Kg.

Peso del carbón de leña = 231,25 Kg. (12-1)

Si en arrabio = 1000 x 0,035 = 35 Kg.
SiO_2 reducido = 35 x 60/28 = 75 Kg.

Sea: X = fundente, Y = escoria.

SiO_2 en escoria = X + 1637,7 x 0,07 – 75 = X + 39,639 = 0,33Y

Escoria sin SiO_2 = Al_2O_3 + CaO + CaS + MgO = 0,67Y

S en mineral = 1637,7 x 0,006 = 9,8262 Kg.
CaS en escoria = 9,8262 x 72/32 = 22,11 Kg.
Ca de este = 22,11 – 9,83 = 12,28 Kg.
CaO de este = 12,28 x 56/40 = 17,19 Kg.
CaO cargado = 1637,7 x 0,03 = 49,13 Kg.
CaO en escoria = 49,13 – 17,19 = 31,94 Kg.

Al_2O_3 en escoria = 1637,7 x 0,02 = 32,75 Kg.

MgO en escoria = 1637,7 x 0,054 = 88,44 Kg.

Escoria sin CaO = 22,11 + 31,94 + 32,75 + 88,44 = 175,24 Kg.

175,24 = 0,67Y ∴
Y = escoria = 175,24/0,67 = 261,55 Kg.

X = fundente = SiO_2 = 0,33 x 261,55 – 39,64 = 46,67 Kg.
Peso del fundente = 46,67 Kg. (12-1)

2.
C del carbón de leña = 231,25 x 0,94 = 217,375 Kg.

Reacciones de reducción:

$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$

C = 75 x 24/60 = 30 Kg.
CO = 75 x 2x22,4 / 60 = 56 m^3

$CaO + C + S = CO + CaS$

C = 22,11 x 12/72 = 3,685 Kg.
CO = 22,11 x 22,4/72 = 6,88 m^3

$Fe_3O_4 + 4C = 3Fe + 4CO$

CO = 1277,4 x 4x22,4/232 = 493,46 m^3

CO total = 56 + 6,88 + 493,46 = 556,34 m^3

Pero en realidad, no todo el Fe_3O_4 puede ser reducido por el C ya que se necesitaría un exceso de C.

C para Fe_3O_4 = 217,375 – 40 – 30 – 3,685 = 143,69 Kg.
Fe_3O_4 reducido por este = 143,69 x 232 / 4x12 = 694,50 Kg.
Fe_3O_4 restante = 1277,4 – 694,50 = 582,90 Kg.
Este es reducido por CO:

$Fe_3O_4 + 4CO = 3Fe + 4CO_2$

CO = CO_2 = 582,9 x 4x22,4/232 = 225,12 m^3

Este CO que se consumió en esta reacción debe restársele al total calculado anteriormente, así:

Composición del gas (12-2)

$CO = 556,34 - 225,12 \qquad = 331,22\ m^3 = 52,49\%$
$CO_2 = 225,12 + (1637,7 \times 0,02) \times 22,4/44 \qquad = 241,79\ m^3 = 38,32\%$
$H_2O = (1637,7 \times 0,02 + 231,25 \times 0,06) \times 22,4/18 = \underline{58,03\ m^3} = \underline{9,19\%}$
Total gas $= 631,04\ m^3 = 100,00\%$

3.
Oxidación del C:

$C \rightarrow CO = 331,22 \times 12/22,4 = 177,44$ Kg.
= C total – C en arrabio = 217,375 – 40 = 177,375 Kg.
Calor del $C \rightarrow CO = 177,44 \times 2430 = 431179,2$ Kcal.

$Al_2O_3 + SiO_2 = 32,75 + 261,55 \times 0,33 = 119,0615$ Kg.

Calor de formación de escoria = 119,0615 x 150 = 17859,225 Kcal.

$$\text{Calor corriente eléctrica} = (431179,2 + 17859,3)\frac{2/3}{1/3} = 898077\ \text{Kcal.}$$

1 Kw-hr = 860 Kcal.

Kw-hr = 898077/860 = 1044,3

Kw-hr requeridos = 1044,3 (12-3)

Si lo interpretamos tomando en cuenta que el CO reacciona a CO_2 y le adicionamos este calor, tendríamos:

$CO \rightarrow CO_2$

Calor de esta reacción = 225,12 x 3034 = 683014,1 Kcal.

Calor corriente eléctrica = (431179,2 + 17859,2 + 683014,1) x 2 = 2'264.105 Kcal.

Kw-hr = 2'264.105/860 = 2633

Kw-hr requeridos = 2633 (12-3)

4.
Calor total en el horno = 2'264.105 x 3/2 = 3'396.157,5 Kcal.

Contenido de calor en el arrabio = 1000 x 330 = 330000 Kcal.
Calor en el arrabio = 330000/3'396.157,5 = 0,0972

Porcentaje del total = 9,72 (12-4)

Contenido de calor en la escoria = 570 x 261,55 = 149083,5 Kcal.
Calor en la escoria = 149083,5/3'396.157,5 = 0,0439

Porcentaje del total = 4,39 (12-4)

Contenido de calor en el gas a 300°C:

$CO = 331,22 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 300) \times 300 = 30664,3$ Kcal.
$CO_2 = 241,79 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 300) \times 300 = 31408,5$
$H_2O = 58,03 \times (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 300) \times 300 = \underline{6754,7}$
Total contenido de calor en el gas = 68827,5 Kcal.

Calor en el gas = 68827,5/3'396.157,5 = 0,0203

Porcentaje del total = 2,03 (12-4)

Potencia calorífica del gas = 331,22 x 3034 = 1'004.921,5 Kcal.

Potencia calorífica del gas = 1'004.921,5 / 3'396.157,5 = 0,2959
Porcentaje del total = 29,59 (12-4)

EJERCICIO N°13 (7)

Un convertidor Bessemer ácido sopla 30 toneladas métricas de arrabio a metal puro en 24 minutos. Se producen 2300 kilogramos de escoria, incluidos 100 kilogramos de SiO_2 corroídos del recubrimiento. La escoria analizó: 38%SiO_2, 12%MnO y 50%FeO. Los gases constan de 750 m^3 de CO_2 y 1500 m^3 de CO; balanceados con N_2. El Fe es oxidado a una rata uniforme.

La presión del soplo es de 1200 mm, manométrica. El soplo entra a 100°C y los gases salen a 1600°C. La temperatura del arrabio cuando se carga es de 1300°C. Al final del soplado, la temperatura de la escoria y el metal es de 1650°C.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire utilizado a condiciones normales.
2. El tiempo de cada período.
3. La composición del arrabio.
4. La energía requerida por las máquinas de soplado, al 80% de eficiencia.
5. Un balance de calor del convertidor (asumir que el calor de formación de la escoria es de 320 kilocalorías por kilogramo de SiO_2).

SOLUCION

1.
<u>Cálculo del oxígeno:</u>

En la escoria:

SiO_2 = 2300 x 0,38 = 874 Kg.
SiO_2 formado del arrabio = 874 – 100 = 774 Kg.

MnO = 2300 x 0,12 = 276 Kg.

FeO = 2300 x 0,5 = 1150 Kg.

$Si + O_2 = SiO_2$:	O_2 = 774 x 22,4/60	= 288,96 m^3
$Mn + ½ O_2 = MnO$:	O_2 = 276 x 11,2/71	= 43,54 m^3
$Fe + ½ O_2 = FeO$:	O_2 = 1150 x 11,2/72	= 178,89 m^3
$C + ½ O_2 = CO$:	O_2 = 1500 x 0,5	= 750,00 m^3
$C + O_2 = CO_2$:	O_2 = 750 x 1	= <u>750,00 m^3</u>
Total O_2		= 2011,39 m^3

Aire = 2011,39/0,21 = 9578 m^3

Volumen de aire a C.N = 9578 m^3 (13-1)

2.
Rata de O_2 = 2011,39/24 = 83,808 m^3/min.

En el 1° período hay oxidación de Si + Mn + algo de Fe.
En el 2° período hay oxidación de C + algo de Fe.

t_1 sin Fe = (288,96 + 43,54) / 83,808 = 3,97 min.
t_2 sin Fe = 750 x 2/83,808 = <u>17,90 min.</u>
21,87 min.

t del Fe = 178,89/83,808 = 2,13 min.

t_1 con Fe = 3,97 + 2,13 x (3,97/21,87) = 4,36 min.

Tiempo de duración del 1º período = 4,36 min. (13-2)

t_2 con Fe = 17,90 + 2,13 x (17.90/21,87) =19,64 min.

Tiempo de duración del 2º período = 19,64 min. (13-2)

3.

Arrabio = Si + Mn + C + Fe.

Si en arrabio = 774 x 28/60 = 361,2 Kg.
Mn en arrabio = 276 x 55/71 = 213,8 Kg.

C del CO = 1500 x 12/22,4 = 803,6 Kg.
C del CO_2 = 750 x 12/22,4) = 401,8 Kg.
Total C del arrabio = 1205,4 Kg.

Fe del arrabio = 30000 – 361,2 – 213,8 – 1205,4 = 28219,6 Kg.

Composición del arrabio: (13-3)

Si =	361,2 Kg.	=	1,20%
Mn =	213,8	=	0,71%
C =	1205,4	=	4,02%
Fe =	28219,6	=	94,07%
	30000	=	100,00%

4.

Utilizamos la fórmula adiabática (ver detalles, Cap. IX):

Energía = 3,45 x $V_0P_0 \cdot [(P_1/P_0)^{0,29} - 1]$

V_0 = volumen de aire comprimido/unidad de tiempo = (9578/24) x 1/60 = 6,651 m^3/seg.
P_0 = 1 atm. = 10333 Kg./m^2
P_1 = 1 atm. + 1200/760 = 2,579 atm. =

$$\text{Energía} = 3,45 x 6,651 \frac{m^3}{seg} x 1 \text{ atm.} x \frac{10333 \text{ Kg.}}{1 \text{ atm} \cdot m^2}\left[(2,579)^{0,29} - 1\right]$$

$$= 74970,5 \frac{\text{Kg.-m}}{\text{seg.}}$$

$$E = 74970,5 \frac{Kg.-m}{seg.} x \frac{1 \text{ Kw}}{102 \text{ Kg.-m}/\text{seg.}} x \frac{1}{0,8} = 919 \text{ Kw}$$

Energía requerida por las máquinas de soplado = 919 Kw. (13-4)

5.

Calor sensible en el soplo al entrar a 100ºC:
= 9578 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 100) x 100 = 291363 Kcal.

Contenido de calor del arrabio al entrar a 1300ºC, suponiendo que funde a 1100ºC:
= 30000 x 230 + 30000 x 0,15 x (1300 – 1100) = 7'800.000 Kcal.

calor de formación de la escoria:
= 320 x 874 = 279680 Kcal.

Calores de oxidación:

Si + O_2 = SiO_2: calor de oxidación = 201000 x (774/60) = 2'592.900 Kcal.

$Mn + ½ O_2 = MnO$: calor de oxidación = 96500 x (276/71) = 375127 Kcal.

$Fe + ½ O_2 = FeO$: calor de oxidación = 64300 x (1150/72) = 1'027.014 Kcal.

$C + ½ O_2 = CO$: calor de oxidación = 803,6 x 2430 = 1'952.748 Kcal.

$C + O_2 = CO_2$: calor de oxidación = 401,8 x 8100 = 3'254.580 Kcal.

Contenido de calor de los gases al salir a 1600°C:

N_2 = 9578 x 0,79 = 7566,62 m^3

$N_2 + CO$ = 9066,62 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 1600) x 1600 = 4'891.623 Kcal.
CO_2 = 750 x (0,406 + 9,0x10^{-5} x 1600) x 1600 = 660.000
Total calor en gases = 5'551.623 Kcal.

Contenido de calor en el acero al salir a 1650°C:

Fe en acero = 28219,6 – 1150 x 56/72 = 27325,2 Kg.
Contenido de calor = 27325,2 x 334 + 27325,2 x 0,21 x (1650 – 1534) = 9'792.259 Kcal.

Contenido de calor de la escoria al salir a 1650°C:
Asumiendo una temperatura de fusión de 1100°C, el contenido de calor será 300 Kcal./Kg.; con un calor específico de 0,25
Contenido de calor = 2300 x 300 + 2300 x 0,25 x (1650 – 1100) = 1'006.250 Kcal.

BALANCE DE CALOR (13-5)

CALOR DISPONIBLE (Kcal.)		(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal.)		(%)
Calor sensible en el soplo	= 291.363	1,66	Calor en el gas	= 5'551.623	31,59
Calor sensible en arrabio	= 7'800.000	44,39	Calor en el acero	= 9'792.259	55,72
Formación de escoria	= 279.680	1,59	Calor en la escoria	= 1'006.250	5,73
Oxidación del Si	= 2'592.900	14,75	Pérdidas por radiación, etc.	= 1'223.280	6,96
Oxidación del Mn	= 375.127	2,13	Total	= 17573.412	100,00
Oxidación del Fe	= 1'027.014	5,85			
$C \rightarrow CO$	= 1'952.748	11,11			
$C \rightarrow CO_2$	= 3'254.580	18.52			
Total	= 17'573.412	100,00			

EJERCICIO N°14 (7)

Un convertidor Bessemer básico procesa 20000 kilogramos de un arrabio que contiene: 4,0%C; 1,0%Si; 1,0%Mn; 2,2%P y 91,8%Fe. Este es soplado hasta Fe puro, perdiendo 5% del Fe durante el soplado, el cual es oxidado a una rata uniforme. Asumir tres períodos diferentes, durante el hervido, un tercio del carbono reacciona a CO_2 y dos tercios a CO.

La escoria no contendrá por encima del 12%SiO_2 y se adiciona CaO para diluirse en este porcentaje.

El aire es soplado a una rata de 400 m^3/min. Los gases salen del convertidor a una temperatura promedio de 1500°C. El aire está frío. El CaO es precalentado a 800°C.

Calor en 1 kilogramo de arrabio al entrar = 255 Kcal.
Calor en 1 kilogramo del baño soplado = 375
Calor en 1 kilogramo de escoria = 450
Calor de formación de la escoria, por kilogramo = 200

PREGUNTAS

1. La duración de cada período del soplado.
2. El peso del CaO a ser adicionado.
3. El calor generado en el convertidor por la oxidación del baño y la formación de la escoria.
4. El calor sacado del convertidor por los gases calientes.
5. Un balance de calor del convertidor.

SOLUCION

1.

Rata de entrada del O_2 = 400 x 0,21 = 84 m^3/min.

Oxidaciones durante el 1° período:

$Si + O_2 = SiO_2$: O_2 = 20000 x 0,01 x 22,4/28 = 160,00 m^3
$Mn + ½ O_2 = MnO$: O_2 = 20000 x 0,01 x 11,2/55 = 40,73 m^3
O_2 del 1° período sin el del Fe = 200,73 m^3

Oxidaciones durante el 2° período:

C = 20000 x 0,04 = 800 Kg.

$C \rightarrow CO$ = 800 x 2/3 = 533,33 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 800 x 1/3 = 266,67 Kg.

$C + ½ O_2 = CO$: O_2 = 533,33 x 11,2/12 = 497,77 m^3
$C + O_2 = CO_2$: O_2 = 266,67 x 22,4/12 = 497,78
O_2 del 2° período sin el del Fe = 955,55 m^3

Oxidaciones durante el 3° período:

$2P + 2{,}5O_2 = P_2O_5$: O_2 sin el del Fe = 20000 x 0,022 x (2,5x22,4/62) = 397,42 m^3

Oxidación del Fe:

Fe oxidado = 20000 x 0,918 x 0,05 = 918 Kg.

$Fe + ½ O_2 = FeO$: O_2 = 918 x 11,2/56 = 183,6 m^3

Cálculo de los tiempos:

t_1 sin oxidación de Fe = 200,73/84 = 2,39 min.
t_2 sin oxidación de Fe = 955,55/84 = 11,38 min.
t_3 sin oxidación de Fe = 397,42/84 = 4,73 min.
18,50 min.
Tiempo de oxidación de Fe = 183,6/84 = 2,19 min.

t_1 total = 2,39 + 2,19 x (2,39/18,5) = 2,67 min.
Duración del 1° período = 2,67 min. (14-1)

t_2 total = 11,38 x 2,19 x (11,38/18,5) = 12,73 min.
Duración del 2° período = 12,73 min. (14-1)

t_3 total = 4,73 + 2,19 x (4,73/18,5) = 5,29 min.
Duración del 3° período = 5,29 min. (14-1)

2.
Cálculo de la escoria:

SiO_2 = 20000 x 0,01 x 60/28 = 428,57 Kg.
MnO = 20000 x 0,01 x 71/55 = 258,18
P_2O_5 = 20000 x 0,022 x 142/62 = 1007,74
FeO = 918 x 72/56 = 1180,29
Escoria sin CaO = 2874,78 Kg.

Escoria total = 428,57/0,12 = 3571,42 Kg.

CaO = 3571,42 – 2874,78 = 696,46

CaO adicionado = 696,46 Kg. (14-2)

3.
Calores generados por las oxidaciones:

Si → SiO_2: calor generado = 201000 x (423,57/60) = 1'435.710 Kcal.
Mn → MnO: calor generado = 96500 x (258,18/71) = 350.907
P → P_2O_5: calor generado = 366900 x (1007,74/142) = 2'603.796
Fe → FeO: calor generado = 64300 x (1180,29/72) = 1'054.065
5'444.478 Kcal.

C → CO: calor generado = 533,33 x 2430 = 1'295.992 Kcal.
C → CO_2: calor generado = 266,76 x 8100 = 2'160.027
3'456.019

Calor de formación de escoria = 3571,42 x 200 = 714.284 Kcal.

Calor de oxidación + formación de escoria = 5'444.478 + 3'456.019 + 714.284
= 9'614.781 Kcal.

Calor de oxidación + formación de escoria = 9'614.781 Kcal. (14-3)

4.
O_2 total = 200,73 + 955,55 + 397,42 + 183,6 = 1737,3 m^3

Gas:
N_2 = 1737,3 x 79/21 = 6535,56 m^3
CO = 497,77 x 2 = 995,54
7531,10 m^3
CO_2 = 497,78 m^3

Contenido de calor en el gas a 1500ºC:

N_2 + CO = 7531,1 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 1500) x 1500 = 3'784.378 Kcal.
CO_2 = 497,78 x (0,406 + 9,0x10^{-5} x 1500) x 1500 = 403.949
4'188.327 Kcal.

Calor sacado por los gases calientes = 4'188.327 Kcal. (14-4)

5.
Contenido de calor en el arrabio al entrar = 20000 x 255 = 5'100.000 Kcal.

Cálculo del precalentamiento del CaO a 800ºC (1073K):

Calor a 273K = 696,64 x (0,1784 + 4,3x10^{-5} x 273 + 1926 x 273^{-2}) x 273 = 41080 Kcal.
A 1073K = 696,64 x (0,1784 + 4,3x10^{-5} x 1073 + 1926 x 1073^{-2})x1073 = 168934.
Calor neto de CaO a 1073K = 168934 – 41080 = 127854 Kcal.

Contenido de calor en la escoria = 450 x 3571,42 = 1'607.139 Kcal.

Acero = 20000 x 0,918 x 0,95 = 17442 Kg.
Contenido de calor en el acero = 17442 x 375 = 6'540.750 Kcal.

BALANCE DE CALOR (14-5)

CALOR DISPONIBLE (Kcal.)		(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal.)		(%)
Oxidación del Si	= 1'435.710	9,67	Gases al salir	= 4'188.327	28,22
Oxidación del Mn	= 350.907	2,36	Escoria al salir	= 1'607.139	10,85
Oxidación del P	= 2'603.796	17,54	Acero al salir	= 6'540.750	44,06
Oxidación del Fe	= 1'054.065	7,10	Pérdidas por radiación. etc.	= 2'506.419	16,89
$C \rightarrow CO$	= 1'295.992	8,73	Total	= 14'842.635	100,00
$C \rightarrow CO_2$	= 2'160.027	14,55			
Formación de escoria	= 714.284	4,81			
Precalentamiento de CaO	= 127.854	0,87			
Arrabio al entrar	= 5'100.000	34,37			
Total	= 14'842.635	100,00			

EJERCICIO N°15 (7)

El siguiente arrabio fue soplado en un convertidor Bessemer ácido que fue cargado con 20 toneladas métricas:

C 4,0%
Mn 0,5
Si 1,4
Fe 94,1

El soplo oxida todas las impurezas y 2% del Fe. Asumir que la oxidación del Fe ocurre uniformemente a lo largo del soplado. Tres cuartos del carbono pasan a CO y el resto a CO_2.

El aire entra a 40°C y los gases salen del horno a una temperatura promedio de 1420°C en el primer período y a 1530°C durante el segundo período. El aire es suministrado a una rata de 550 metros cúbicos por minuto.

El arrabio se encuentra a 1250°C cuando es cargado, y el baño (incluyendo la escoria) se encuentra a 1600°C al final del soplado.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado.
2. El tiempo de cada período de soplado.
3. la composición de los gases en cada período.
4. La composición de la escoria.
5. El balance de calor de la operación.
6. la rata aproximada de cambio de temperatura del baño para cada período, asumiendo que la mitad del calor total absorbido por el convertidor es absorbido en cada período y que la capacidad calorífica total del baño es la misma que la del Fe fundido.

SOLUCION

1.
<u>Oxidación de impurezas:</u>

1° período sin Fe:
$Si + O_2 = SiO_2$: $O_2 = 20 \times 1000 \times 0,014 \times 22,4/28 = 224,00\ m^3$
$Mn + ½\ O_2 = MnO$: $O_2 = 20 \times 1000 \times 0,005 \times 11,2/55 = \underline{20,36}$
244,36

2° período sin Fe:

C en arrabio = 20000 x 0,04 = 800 Kg.
$C \rightarrow CO$ = 800 x ¾ = 600 Kg.
$C \rightarrow CO_2$ = 800 x ¼ = 200 Kg.

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$: O_2 = 600 x 11,2/12 = 560,00 m^3
$C + O_2 = CO_2$: O_2 = 200 x 22,4/12 = 373,33 m^3
933,33 m^3

Fe en arrabio = 20000 x 0,941 = 18820 Kg.
Fe oxidado = 18820 x 0,02 = 376,4 Kg.

$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO$: O_2 = 376,4 x 11,2/56 = 75,28 m^3

Total O_2 = 244,36 + 933,33 + 75,28 = 1252,97 m^3

Aire = 1252,97/0,21 = 5966,52 m^3

Volumen de aire utilizado = 5966,52 m^3 (15-1)

2.
Rata de O_2 = 550 x 0,21 = 115,5 m^3/min.

t_1 sin oxidación de Fe = 244,36/115,5 = 2,12 min.
t_2 sin oxidación de Fe = 933,33/115,5 = 8,08 min.
10,20 min.
t de oxidación de Fe = 75,28/115,5 = 0,65 m^3

t_1 total = 2,12 + 0,65 x (2,12/10,20) = 2,26 min.
Duración del 1° período = 2,26 min. (15-2)

t_2 total = 8,08 + 0,65 x (8,08/10,20) = 8,59 min.
Duración del 2° período = 8,59 min. (15-2)

3.
Durante el primer período el único gas que se produce es el N_2 del soplo.

N_2 = 244,36x79/21 + 75,28 x (2,12/19,2) x 79/21 = 978,12 m^3
Gas del 1° período = N_2 = 100% (15-3)

Gas del 2° período = $CO + CO_2 + N_2$

Composición del gas del 2° período (15-3)

CO = 2 x 560	= 1120,00 m^3	= 21,42%
CO_2	= 373,33	= 7,14%
N_2 = (933,33 + 75,28 x 8,08/10,2) x 79/21	= 3735,44	= 71,44%
	5228,77 m^3	100,00%

4.
Escoria = SiO_2 + FeO + MnO

Composición de la escoria (15-4)

SiO_2 = 20000 x 0,014 x 60/28	= 600,0 Kg.	= 49,47%
MnO = 20000 x 0,005 x 71/55	= 129,1 Kg.	= 10,64%
FeO = 376,4 x 72/56	= 483,9 Kg.	= 39,89%
	1213,0 Kg.	= 100,00%

5.
Contenido de calor en el aire al entrar a 40°C:

$= 5966,52 \times (0,302 + 2,2x10^{-5} \times 40) \times 40 = 72286$ Kcal.

Contenido de calor en el arrabio al entrar a 1250°C:

$= 20000 \times 230 + 20000 \times 0,15 \times (1250 - 1100) = 5'050.000$ Kcal.

Calor generado por oxidación (Kcal):

$Si \rightarrow SiO_2 = 201000 \times (600/60) = 2'010.000$
$Mn \rightarrow MnO = 96500 \times (129,1/71) = 175.467$
$Fe \rightarrow FeO = 64300 \times (483,9/72) = 432.150$
$C \rightarrow CO = 600 \times 2430 = 1'458.000$
$C \rightarrow CO_2 = 200 \times 8100 = 1'620.000$

Contenido de calor en los gases al salir (Kcal):

1° período a 1420°C:
$N_2 = 978,12 \times (0,302 + 2,2x10^{-5} \times 1420) \times 1420 = 462.847$

2° período a 1530°C:

$CO + N_2 = 4855,44 \times (0,302 + 2,2x10^{-5} \times 1530) \times 1530 = 2'493.559$
$CO_2 = 373,33 \times (0,406 + 9,0x10^{-5} \times 1530) \times 1530 = 310.559$
2'804.118

Contenido de calor en el acero (Fe) a 1600°C:

Acero líquido = $20000 \times 0,941 \times 0,98 = 18443,6$ Kg.
Contenido de calor = $18443,6 \times 334 + 18443,6 \times 0,21 \times (1600 - 1534) = 6'415.791$ Kcal.

Contenido de calor en la escoria a 1600°C:
$= 1213 \times 300 + 1213 \times 0,30 \times (1600 - 1100) = 545850$ Kcal.

Calor de formación de la escoria (Tabla XLIV.B):

$FeO.SiO_2 = 483,9 \times 114 = 55165$
$MnO.SiO_2 = -129,1 \times 66 = -8521$
46644 Kcal.

BALANCE DE CALOR (15-5)

CALOR DISPONIBLE (Kcal.)		(%)	DISTRIBUCION DEL CALOR (Kcal)		(%)
Aire en entrar	= 72.286	0,67	Gases 1° período	= 462.847	4,26
Arrabio al entrar	= 5'050.000	46,48	Gases 2° período	= 2'804.118	25,81
Formación de escoria	= 46.644	0.43	Acero fundido	= 6'415.791	59,05
Oxidación del Si	= 2'010.000	18,50	Escoria fundida	= 545.850	5,03
Oxidación del Mn	= 175.467	1,61	Pérdidas por radiación, etc.	= 635.941	5,85
Oxidación del Fe	= 432.150	3,98	Total	= 10'864.547	100,00
$C \rightarrow CO$	= 1'458.000	13,42			
$C \rightarrow CO_2$	= 1'620.000	14,91			
Total	= 10'864.547	100,00			

6.
La capacidad calorífica de un cuerpo (7) es su peso multiplicado por su calor específico.

La elevación de temperatura (7) se puede estimar, dividiendo el calor neto generado por la capacidad calorífica del baño.

1° período:

capacidad calorífica del Fe líquido = 0,21:

Calor generado = 2'010.000 + 175467 + 432150 x (2,26/10,85) = 2'275.482 Kcal.
Calor distribuido = 462847 + 635941 x ½ = 780818 Kcal.
Calor neto = 2'275.482 – 780818 = 1'494.665 Kcal.

$$\text{Rata de cambio en temperatura} = \frac{1'494.665}{20000x0{,}21x2{,}26} = 157{,}5\frac{°C}{min.}$$

Rata de cambio en temperatura, 1° período = 157,5°C/min (15-6)

2° período:

Calor generado = 1'458.000 + 1'620.000 + 432150 x (8,59/10,85) = 3'420.135 Kcal.
Calor distribuido = 2'804.118 + 635941 x ½ = 3'122.089 Kcal.
Calor neto = 3'420.135 – 3'122.089 = 298047 Kcal.

$$\text{Rata de cambio en teperatura} = \frac{298.047}{20000x0{,}21x8{,}59} = \frac{8{,}26°C}{min.}$$

Rata de cambio en temperatura, 2° período = 8,26°C/min. (15-6)

EJERCICIO N°16 (7)

Un horno de hogar abierto trata una carga de 40 toneladas de arrabio fundido y 44 toneladas de chatarra, se utilizan 5600 kilogramos de mineral para la oxidación y 8000 kilogramos de $CaCO_3$ como fundente.

ARRABIO (%)	CHATARRA (%)	MINERAL (%)
C = 3,60	C = 0,5	Fe_2O_3 = 73
Si = 0,90	Si = 0,1	SiO_2 = 15
Mn = 1,90	Mn = 0,3	MnO = 12
P = 0,15	P = 0,5	
Fe = 93,45	Fe = 98,6	

El baño, justo antes de la colada lleva 0,5% de carbono y manganeso residual igual al 25% del manganeso original en la chatarra y el arrabio, pero no lleva silicio ni fósforo.

La escoria contiene 20%FeO, todo el cual se asume que proviene de la oxidación del Fe de la chatarra.

El horno utiliza como combustible 10000 Kg. de aceite con 82%C, 15%H, 3%N y para su combustión se utiliza 10% de aire en exceso. A través de las puertas del horno, se introduce aire adicional hasta hacer un total del 50% de exceso. No hay CO en los gases.

Los siguientes son los datos de temperaturas del horno:

Materiales al entrar:

Arrabio	= 1250°C
Chatarra, mineral, piedra caliza y aceite	= 0°C
Aire para la combustión	= 1000°C
Aire filtrado por las puertas	= 50°C

Productos al salir:

Acero y escoria = 1500°C
Gases = 1600°C

Calor en arrabio fundido a 1200°C = 245 Kcal; calor específico líquido = 0,15
Calor en acero fundido a 1350°C = 300 Kcal.; calor específico = 0,165
Calor en escoria fundida a 1400°C = 400 Kcal.; calor específico = 0,30
Asumir el calor de formación de la escoria = 128 Kcal./Kg. de escoria.

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas completo del horno.
2. La composición del acero, la escoria y los gases.
3. El porcentaje de la oxidación total realizada por el mineral.
4. El balance de calor de la operación.
5. La eficiencia térmica de los regeneradores y del horno, como un todo.

SOLUCION

1.

A continuación se presenta el balance de cargas, los cálculos se harán en todo el ejercicio

BALANCE DE CARGAS (16-1)

CARGA (Kg.)		PRODUCTOS (Kg.)					
		ACERO		ESCORIA		GASES	
Arrabio	**40000,00**						
C	1440,00	C	413,18	---	---	C	1026,82
Si	360,00	---	---	Si	360;00	---	---
Mn	760,00	Mn	223,00	Mn	537,00	---	---
P	60,00	---	---	P	60,00	---	---
Fe	37380,00	Fe	37380,00	---	---	---	---
Chatarra	**44000,00**						
C	220,00	---	---	---	---	C	220,00
Si	44,00	---	---	Si	44,00	---	---
Mn	132,00	---	---	Mn	132,00	---	---
P	220,00	---	---	P	220,00	---	---
Fe	43384,00	Fe	41757,93	Fe	1626,07	---	---
Mineral	**5600,00**						
Fe_2O_3	4088,00	Fe	2861,60	O	1226,40	---	---
SiO_2	840,00	---	---	SiO_2	840,00	---	---
MnO	672,00	---	---	MnO	672,00	---	---
$CaCO_3$	**8000,00**			CaO	4480,00	CO_2	3520,00
Aceite	**10000,00**						
C	8200,00	---	---	---	---	C	8200,00
H	1500,00	---	---	---	---	H	1500,00
N	300,00	---	---	---	---	N	300,00
Aire oxida.	**15433,88**						
N	11853,22	---	---	---	---	N	11853,22
O	3580,66	---	---	O	255,75	O	3324,91
Aire comb.	160574,74						
N	123321,40	---	---	---	---	N	123321,40
O	37253,34	---	---	---	---	O	37253,34
Aire adic.	**58390,82**						
N	44844,15	---	---	---	---	N	44844,15
O	13546,67	---	---	---	---	O	13546,67
Total	**341999,44**		**82635,71**		**10453,28**		**248910,41**

2.
Carga (Kg.):

Arrabio = 40000

C = 40000 x 0,036 = 1440
Si = 40000 x 0,009 = 360
Mn = 40000 x 0,019 = 760
P = 40000 x 0,0015 = 60
Fe = 40000 x 0,9345 = 37380

Chatarra = 44000

C = 44000 x 0,005 = 220
Si = 44000 x 0,001 = 44
Mn = 44000 x 0,003 = 132
P = 44000 x 0,005 = 220
Fe = 44000 x 0,986 = 43384

Mineral = 5600

Fe_2O_3 = 5600 x 0,73 = 4088
SiO_2 = 5600 x 0,15 = 840
MnO = 5600 x 0,12 = 672

Cálculo de la escoria (Kg.):

Escoria = SiO_2 + MnO + P_2O_5 + CaO + FeO

Si oxidado = 360 + 44 = 404
SiO_2 formado = 404 x 60/28 = 865,71
O de este = 865,71 – 404 = 461,71
SiO_2 a escoria = 865,71 + 840 = 1705,71

Mn (arrabio + chatarra) = 760 + 132 = 892
Mn en acero = 892 x 0,25 = 223
Mn oxidado = 892 – 223 = 669
MnO formado = 669 x 71/55 = 863,62
O de este = 863,62 – 669 = 194,62
MnO a escoria = 863,62 + 672 = 1535,62

P cargado = 60 + 220 = 280
P_2O_5 formado (a escoria) = 280 x 142/62 = 641,29
O de este = 641,29 – 280 = 361,29

$CaCO_3$ = 8000
CaO a escoria = 8000 x 0,56 = 4480
CO_2 = 8000 x 0,44 = 3520

Escoria sin FeO = 100 – 20 = 80%
Escoria sin FeO = SiO_2 + MnO + P_2O_5 + CaO
Escoria sin FeO = 1705,71 + 1535,62 + 641,29 + 4480 = 8362,62

FeO en escoria = 8362,62 x 20/80 = 2090,66
Fe de este = 2090,66 x 56/72 = 1626,07
O de este = 2090,66 x 16/72 = 464,59

Composición de la escoria (16-2)

SiO_2	= 1705,71 Kg.	= 16,32%
MnO	= 1535,62	= 14,69%
P_2O_5	= 641,29	= 6,13%
CaO	= 4480,00	= 42,86%
FeO	= 2090,66	= 20,00%
	10453,28	= 100,00%

Acero = Fe + Mn + C

Fe cargado = 37380 + 43384 + 4088 x 112/160 = 83625,6 Kg.
Fe → acero = 83625,6 – 1626,07 = 81999,53

Acero sin C = 100 – 0,5 = 99,5% = 81999,53 + 223 = 82222,53 Kg.
C → acero = 82222,53 x 0,5/99,5 = 413,18 Kg.

Composición del acero (16-2)

Fe	= 81999,53 Kg.	= 99,23%
Mn	= 223,00	= 0,27%
C	= 413,18	= 0,50%
	82635,71 Kg.	= 100,00%

Gas = $N_2 + O_2 + H_2O + CO_2$

C (arrabio + chatarra) → gas = 1026,82 + 220 = 1246,82 Kg.

$C + O_2 = CO_2$: O = 1246,82 x 32/12 = 3324,85 Kg. = 2327,40 m^3
CO_2 = 1246,82 x 44/12 = 4571,67 Kg. = 2327,40 m^3

O requerido para oxidación de impurezas
= 461,71 + 194,62 + 361,29 + 464,59 + 3324,85 = 4807,06 Kg. = 3364,94 m^3
O aportado por Fe_2O_3 = 4088 x 3x16/160 = 1226,4 Kg. = 858,48 m^3
O aportado por el aire para oxidación = 4807,06 – 1226,64 = 3580,66 Kg. = 2506,46 m^3

Aire para oxidación = 2506,46/0,21 = 11935,52 m^3

C en aceite = 10000 x 0,82 = 8200 Kg.
$C + O_2 = CO_2$: O = 8200 x 32/12 = 21866,67 Kg. = 15306,67 m^3
CO_2 = 8200 x 44/12 = 30066,67 Kg. = 15306,67 m^3

H en aceite = 10000 x 0,15 = 1500 Kg.
$H_2 + ½ O_2 = H_2O$: O = 1500 x 16/2 = 12000 Kg. = 8400 m^3
H_2O = 1500 x 18/2 = 13500 Kg. = 16800 m^3

O teórico para combustión = 21866,67 + 12000 = 33866,67 Kg. = 23706,67 m^3

Aire teórico para combustión = 23706,67/0,21 = 112888,9 m^3

Aire exceso adicional = 112888,9 x 0,5 = 56444,45 m^3
O_2 de este = 56444,45 x 0,21 = 11853,33 m^3.

Si interpretamos que el 10% de aire exceso para la combustión, forma parte del 50% del exceso adicional, la composición del gas se podría calcular del siguiente modo:

Aire total = 11935,52 + 112888,9 + 56444,45 = 181268,87 m^3
N_2 total en gas = 181268,87 x 0,79 + 240 = 143442,41 m^3

Composición del gas (16-2)
N_2 = 143442,41 m^3 = 74,90%
O_2 = 11853,33 = 6,19%
H_2O = 16800,00 = 8,77%
CO_2 = 19426,07 = 10,14%
191521,81 m^3 = 100,00%

3.
Total óxidos = $SiO_2 + MnO + P_2O_5 + FeO + CO_2$
= 865,71 + 863,62 + 641,29 + 2090,66 + 4571,67 = 9032,95 Kg.

O aportado por el mineral = 1226,4 Kg.

Los primeros elementos en oxidarse son el Si y el Mn, los cuales consumen el siguiente oxígeno:
Si = 461,71 Kg.
Mn = 194,62
656,33 Kg.

O restante = 1226,4 – 656,33 = 570,07 Kg.

El P no puede pasar a la escoria mientras exista C, de modo que el siguiente elemento en oxidarse es el C.

$C + O_2 = CO_2$: CO_2 = 570,07 x 44/32 = 783,85 Kg.

Así: $SiO_2 + MnO + CO_2$ = 865,71 + 863,62 + 783,85 = 2513,18 Kg.

Oxidación por el mineral = 2513,18/9032,95 = 0,2782
Oxidación por el mineral = 27,82% (16-3)

4.
Calor sensible en arrabio fundido a 1250°C:
= 40000 x 245 + 40000 x 0,15 x (1250 – 1200) = 10'100.000 Kcal.

Calor sensible en aire para combustión a 1000°C:
= (11935,52 + 112888,9x1,1) x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 1000) x 1000 = 40'233.604 Kcal.

Calor sensible en el aire filtrado por las puertas a 50°C:
= 112888,9 x 0,4 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 50) x 50 = 684333 Kcal.

Calores de oxidación:

$Si \rightarrow SiO_2$ = 404 x 7160	=	2'892.640
$Mn \rightarrow MnO$ = 669 x 1757	=	1'175.433
$P \rightarrow P_2O_5$ = 280 x 5912	=	1'655.360
$Fe \rightarrow FeO$ = 1626,07 x 1151	=	1'871.607
		7'595.040 Kcal.

Calores de combustión:

$C \rightarrow CO_2$ = 9446,82 x 8100	=	76'519.242
$H \rightarrow H_2O$ = 1500 x 22,4/2 x 2582	=	43'377.600
		119'896.842 Kcal.

Calor de descomposición del Fe_2O_3:
= (4088/160) x 198500 = 5'071.675 Kcal.

Calor de descomposición del $CaCO_3$:
= 43450 x 8000/100 = 3'476.000 Kcal.

Calor por evaporación del agua:
= 13500 x 586 = 7'911.000 Kcal.

Contenido de calor en acero fundido a 1350°C:
= 82635,71 x 300 + 82635,71 x 0,165 x (1500 – 1350) = 26'835.947 Kcal.

Contenido de calor en escoria fundida a 1400°C:
= 10453,28 x 400 + 10453,18 x 0,3 x (1500 – 1400) = 4'494.910 Kcal.

Calor de formación de la escoria:
= 10453,28 x 128 = 1'338.020 Kcal.

Contenido de calor en los gases a 1600°C:

$N_2 + O_2$ = 155295,74 x (0,302 + 2,2x10^{-5} x 1600) x 1600 = 83'785.158
H_2O = 16800 x (0,373 + 5x10^{-5} x 1600) x 1600 = 12'176.640
CO_2 = 19426,07 x (0,406 + 9x10^{-5} x 1600) x 1600 = 17'094.942
113'056.740 Kcal.

BALANCE DE CALOR (16-4)

CALOR DISPONIBLE (Kcal.)	(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal.)	(%)
Arrabio al entrar = 10'100.000	5,62	Descomposición Fe_2O_3 = 5'071.675	2,82
Aire para combustión = 40'233.604	22,37	Descomposición $CaCO_3$ = 3'476.000	1,93
Aire filtrado = 684.333	0,38	Evaporación de agua = 7'911.000	4,40
Oxidación de elementos = 7'595.040	4,22	Acero al salir = 26'835.947	14,94
Combustión = 119'896.842	66.67	Escoria al salir = 4'494.910	2,50
Formación de escoria = 1'338.020	0,74	Gases al salir = 113'056.740	62,93
Total = 179'847.839	100,00	Pérdidas diferentes = 19'001.567	10,58
		Total = 179'847.839	100,00

5.
Potencia calorífica del aceite = 8100C + 34000 x (H – O/8) + 2200S – 586 x (9H + W)
= 8200 x 8100 + 34000 x 1500 – 586 9 x 1500 = 109'509.000 Kcal.

Calor utilizado en calentar el aire = 40'233.604 Kcal.

Eficiencia de regeneradores = 40'233.604/109'509.000 = 0,367
Eficiencia de regeneradores = 36,7% (16-5)

Calor sensible en el acero = 26'835.947 Kcal.
Total calor disponible = 179'847.839 Kcal.

Eficiencia total del horno = 26'835.947/179'847.839 = 0,1494
Eficiencia total del horno = 14,94% (16-5)

EJERCICIO N°17 (7)

Un horno eléctrico para aceros con capacidad para 10 toneladas, después de una colada, es cargado con 8000 kilogramos de chatarra de acero y 2000 kilogramos de arrabio, y durante el calentamiento se cargan 100 kilogramos de ferromanganeso, 50 de ferrosilicio, 1000 kilogramos de mineral de hierro y 100 de lima.

Las composiciones de los materiales cargados y del acero colado son las siguientes:

	Chatarra de acero (%)	Arrabio (%)	Ferromanganeso (%)	Acero final (%)	Ferrosilicio (%)
Fe	99,0	94	13	98,9	48
C	0,5	4	5	0,6	2
Si	0,2	1	2	0,3	50
Mn	0,3	1	80	0,2	

Mineral de hierro (%)	Lima (%)	Electrodos (%)
Fe_2O_3 90	CaO 100	C 95
SiO_2 8		SiO_2 5
Al_2O_3 2		

El aire que se filtra consume 100 Kg. de electrodos.
Calor en la escoria fundida, colada = 500 Kcal./Kg.
Calor en el acero fundido, colado = 325 Kcal./Kg.; peso del acero = 10000 Kg.
Calor de formación de la escoria = 150 Kcal./Kg. de escoria.
Asumir que todo el C pasa a CO.
Energía utilizada = 1500 Kw. por 5 horas. Los gases salen a 1000°C.

PREGUNTAS

1. Un balance de carga de los materiales que pasan a través del horno.
2. Un balance térmico del calor desarrollado y distribuido.
3. La eficiencia térmica neta del horno.

SOLUCION

1.

El cuadro con el balance de cargas aparece en la página siguiente, a continuación presentaremos los cálculos sobre los cuales se fundamenta:

Fe en acero = 9890 Kg.

Fe_2O_3 = 2FeO + O: O = 900 x 16/160 = 90 Kg., FeO = 900 – 90 = 810 Kg.

Fe del acero proveniente del Fe_2O_3
= 9890 – 8000 x 0,99 – 2000 x 0,94 – 100 x 0,13 – 50 x 0,48 = 53 Kg.
FeO reducido = 53 x 72/56 = 68,14
O de este = 68,14 – 53 = 15,14

O total aportado por el Fe_2O_3 = 15,14 + 90 = 105,14 Kg.

FeO a escoria = 810 – 68,14 = 741,86 Kg.

C en acero = 10000 x 0,006 = 60
Si en acero = 10000 x 0,003 = 30
Mn en acero = 10000 x 0,002 = 20

Cálculo del 0xígeno:

Si → SiO_2 = 11 + 20 + 2 = 33 Kg.: SiO_2 formado = 33 x 60/28 = 70.71 Kg.
O = 70,71 – 33 = 37,71
Mn → MnO = 24 + 20 + 60 = 104 Kg.: MnO formado = 104 x 71/55 = 134,25 Kg.
O = 134,25 – 104 = 30,25

O del Si y el Mn = 70,71 + 30,25 = 67,96 Kg.

C del arrabio → CO = 66 Kg.
O de este = 66 x 16/12 = 88 Kg.
CO = 88 + 66 = 154 Kg.

BALANCE DE CARGAS (17-1)

CARGA (Kg.)		PRODUCTOS (Kg.)					
		ACERO		ESCORIA		GASES	
Chatarra	**8000**						
Fe	7920	Fe	7920	---	---	---	---
C	40	C	40	---	---	---	---
Si	16	Si	5	Si	11	---	---
Mn	24	---	---	Mn	24	---	---
Arrabio	**2000**						
Fe	1880	Fe	1880	---	---	---	---
C	80	C	14	---	---	C	66
Si	20	---	---	Si	20	---	---
Mn	20	---	---	Mn	20	---	---
Fe-Mn	**100**						
Fe	13	Fe	13	---	---	---	---
C	5	C	5	---	---	---	---
Si	2	---	---	Si	2	---	---
Mn	80	Mn	20	Mn	60	---	---
Fe-Si	**50**						
Fe	24	Fe	24	---	---	---	---
C	1	C	1	---	---	---	---
Si	25	Si	25	---	---	---	---
Mineral	**1000**						
Fe_2O_3	900	Fe	53	FeO	741,86	O	37,18
				O	67,96		
SiO_2	80	---	---	SiO_2	80	---	---
Al_2O_3	20	---	---	Al_2O_3	20	---	---
Lima	**100**						
CaO	100	---	---	CaO	100	---	---
Electrodos	**100**						
C	95	---	---	---	---	C	95
SiO_2	5	---	---	SiO_2	5	---	---
Aire	**925.3**						
N	710.63	---	---	---	---	N	710,63
O	214,67	---	---	---	---	O	214,67
Total	**12275,3**		**10000**		**1151,82**		**1123,48**

Fe de este = 88 x 56/16 = 308
FeO de este = 308 + 88 = 396
FeO a escoria = 810 – 396 = 414

Cálculo de la escoria:

SiO_2 = 70,71 + 80 + 5 = 155,71
MnO = 134,25
Al_2O_3 = 20
CaO = 100
FeO = 741,86
1151,82 Kg.

Cálculo del aire:

C + O = CO: C = 66 + 95 = 161 Kg.
O = 161 x 16/12 = 214,67
N = 214,67 x 76,8/23,2 = 710,63
Aire = 710,63 + 214,67 = 925,3

2.

A continuación se presenta el balance de calor, fundamentado en los cálculos que aparecen más abajo.

BALANCE DE CALOR (17-2)

CALOR DESARROLLADO (Kcal.)		(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal)		(%)
Energía utilizada	= 6'450.000	86,78	Descomposición de Fe_2O_3	= 454.040	6,11
Combustión $C \rightarrow CO$	= 391.230	5,26	Escoria fundida	= 575.910	7,75
Oxidación $Si \rightarrow SiO_2$	= 236.280	3,18	Acero fundido	= 3'250.000	43,72
Oxidación $Mn \rightarrow MnO$	= 182.728	2,46	En gases	= 282.438	3,80
Formación de escoria	= 172.773	2,32	Pérdidas diversas	= 2'870.623	38,62
Total	= 7'433.011	100,00	Total	= 7'433.011	100,00

1 Kw = 860 Kcal./hr.

Calor desarrollado (Kcal.):

Energía suministrada = 1500 Kw por 5 horas.
Calor suministrado = 860 x 1500 x 5 = 6'450,000 Kcal

Calor de combustión: $C \rightarrow CO$ = 161 x 2430 = 391.230

Oxidaciones: $Si \rightarrow SiO_2$ = 33 x 7160 = 236.280
$Mn \rightarrow MnO$ = 104 x 1757 = 182.728

Calor de formación de escoria = 1151,82 x 150 = 172773

Distribución del Calor (Kcal.):

Calor de descomposición del Fe_2O_3
= 198500 x 900/160 = 1'116.562,5
Calor por reoxidación del FeO = 64300 x 741,86/72 = 662522
Calor neto de descomposición del Fe_2O_3
= 1'116.562,5 – 662.522 = 454040

Contenido de calor en la escoria fundida
= 1151,82 x 500 = 575810

Contenido de calor en los gases al salir a 1000°C:
$CO + N_2 = 1086,3 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 282438$

Las pérdidas por radiación, etc. se calculan por diferencia.

3.

Contenido de calor en acero, escoria y gases
= 575910 + 3'250.000 + 282438 = 4'108.438 Kcal.

Eficiencia del horno = 4'108.438 / 7'250.283 = 0,5667

Eficiencia térmica del horno = 56,67% (17-3)